

Bericht

Ermittlung von Art und Umfang der Partikelemissionen von Dieselkraftfahrzeugen

Auftraggeber:

Ministerium für Umwelt und Verkehr
Baden-Württemberg
Referat 37
Argonhaus
70178 Stuttgart

Bearbeitung:

Referat 33 - Luftqualität, Lärm, Verkehr
S. Drechsler (Dipl.Ing. FH)

Karlsruhe, im Dezember 1999



Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
Griesbachstraße 1
76185 Karlsruhe

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	2
2. CHARAKTERISIERUNG VON RUßPARTIKEL	3
2.1 Grundbegriffe und Definitionen	3
2.2 Entstehung von Rußpartikel	5
2.3 Stoffliche Zusammensetzung der Rußpartikel	7
2.4 Partikelgrößenverteilung im Abgas	7
3. MOTORTECHNIK	9
3.1 Technik des Dieselmotor	9
3.1.1 Indirekte Einspritzverfahren (IDI)	9
3.1.2 Direkteinspritzverfahren	9
4. DIESELKATALYSATORTECHNIK	17
5. FILTERTECHNIK	21
5.1. Mechanismus der Partikelfiltration	21
5.2 Grundsätzliche Anforderungen	22
5.2.1 Partikelfilter – passive Systeme (nicht regenerierbar)	23
5.2.2 Partikelfilter – aktives System	25
5.2.3 Filtersysteme mit Regenerierung durch Additiv-Verbrennung	27
6. ERGEBNISSE VON EMISSIONSMESSUNGEN	29
6.1 Partikelanzahl und Partikelmenge an Pkws ohne Filtereinheit	29
6.2 Ergebnisse von Messungen der Partikelanzahl bei leichten Nutzfahrzeugen und Pkws mit Ottomotor (Fa. FORD)	34
6.3 Messungen an Diesel - Bussen	35
6.4 Partikelemissionen von LKW	37
6.5 Einfluß des Kaltstarts auf die Partikelemission beim Dieselfahrzeug	37
7. AUSBLICK	40
8. ZUSAMMENFASSUNG	41
9. ANHANG	44
9.1 Stand der gesetzlichen Verordnungen auf EU-Ebene	44
9.2 Aktuelle Meinungen aus Politik und Wissenschaft	46
10. LITERATURVERZEICHNIS	48

1. Einleitung

Partikelemissionen aus anthropogenen Quellen sind seit einiger Zeit vermehrt Gegenstand der öffentlichen Diskussion und wissenschaftlicher Untersuchungen. Grund dafür sind Ergebnisse einiger Studien die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit aufzeigen[UBA, 1999; Health Effects Institute USA, 1999; U.S. EPA, 1999]. Als eine wichtige Quelle für Partikelemissionen wird der Verkehr und hier vor allem Dieselmotorkraftfahrzeuge angesehen. Charakteristisch für Partikel aus Verbrennungsmotoren ist der relativ hohe Anteil an Kohlenstoff und die fast ausschließliche Emission von kleinen lungengängigen Partikel, d.h. kleiner $2,5\text{ }\mu\text{m}$ im Durchmesser.

Im vorliegenden Bericht wird neben der Beschreibung und Bewertung der derzeit verfügbaren Minderungsstechniken zur Reduzierung der Partikelemissionen auf die Problematik der Partikelgrößenverteilung im Abgas von Kraftfahrzeugen eingegangen.

2. Charakterisierung von Rußpartikel

2.1 Grundbegriffe und Definitionen

Nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisstand ist vor allem die Größe der Partikel von entscheidender Bedeutung für die menschliche Gesundheit und nicht die Herkunft oder Zusammensetzung der Partikel. Die in der Außenluft oder im Abgas vorkommenden Teilchen werden daher nicht in Ruß-, Staub-, oder Aerosolteilchen unterschieden, sondern man spricht allgemein von Partikel.

Die geometrischen Abmessungen und die tatsächliche Form von Partikel sind nur mit sehr hohem messtechnischen Aufwand, z.B. durch Rasterelektronenmikroskopie, zu ermitteln. Aus diesem Grund beschreibt man die Größe der einzelnen Partikel über ihre Beweglichkeit bzw. über ihr aerodynamisches Verhalten in der Luft. Die Partikel verschiedener Form und Größe werden dabei annäherungsweise als Kugel betrachtet. Für größere Partikel ist die Sedimentation bestimmend. Solche Partikel werden mit dem aerodynamischen Durchmesser beschrieben. Der aerodynamische Durchmesser eines Partikels beliebiger Form und Dichte ist gleich dem Durchmesser einer Kugel mit der Dichte 1 (1 g/cm^3), welche in ruhender oder laminar strömender Luft die gleiche Sinkgeschwindigkeit wie das betrachtete Partikel besitzt. Bei Partikel mit Durchmessern kleiner als $1 \text{ }\mu\text{m}$ ist die Diffusion die bestimmende Einflussgröße. Die Beschreibung der Partikelgrößen erfolgt bei diesen Partikeln durch den Diffusions-Äquivalentdurchmesser (Mobilitätsdurchmesser). Der Mobilitätsdurchmesser eines beliebig geformten Partikels entspricht dem Durchmesser einer Kugel, die in Luft die gleiche Mobilität (Beweglichkeit) wie das betrachtete Partikel besitzt.

Für die toxikologische Bewertung von Partikel ist insbesondere die Partikelgröße von besonderem Interesse. Die Partikelgröße ist der wesentliche Parameter, der bestimmt, welche Teilchen überhaupt eingeatmet werden können und wo die Ablagerung im Atemtrakt erfolgt. Die Einatembarkeit von luftgetragenen Partikeln kann experimentell an Modellköpfen im Windkanal unter vorgegebenen Bedingungen (Atemweg, Atemfrequenz, Einatemgeschwindigkeit, Windrichtung und -geschwindigkeit im Umfeld des Modellkopfes usw.) bestimmt werden. Auch für die Ablagerung (Deposition) der Partikel in den verschiedenen Bereichen des Atemtraktes liegen experimentelle Daten vor.

Für die messtechnische Bestimmung von Partikeln bedeutet dies, dass die verfügbaren Mess- und Probenahmegeräte die luftgetragenen Partikel in Abhängigkeit vom Ablagerungsort im Atemtrakt und somit größenselektiv erfassen müssen. Für eine solche wirkungsbezogene Messung von Partikeln wurden in der DIN ISO 7708 [DIN ISO, 1996] und der DIN EN 481 [DIN EN, 1993] Konventionen für die messtechnische Erfassung von Partikeln festgelegt.

Die Konventionen beruhen auf gemittelten experimentellen Daten über die Einatembarkeit und die Ablagerung von Schwebstaubpartikeln im Atemtrakt bei vorgegebenen Randbedingungen.

Es wurden folgende Konventionen festgelegt:

- **Einatembare Fraktion (EF)**

Die einatembare Fraktion ist der Anteil an allen in der Luft vorhandenen Partikel, der durch Mund oder Nase eingeatmet wird.

- **Thorakale Fraktion (TF)**

Die thorakale (den Brustkorb betreffende) Fraktion ist der Anteil an allen eingeatmeten Partikel, der über den Kehlkopf hinaus in den Atemtrakt eindringt.

- **Alveolengängige Fraktion (AF)**

Die alveolengängige Fraktion ist ein Teil der thorakalen Fraktion und umfasst alle eingeatmeten Partikel, die bis in die nichtzilierten Luftwege (innerster Bereich des Atemtraktes) eindringen.

Bei Kindern und Erwachsenen mit bestimmten Lungenkrankheiten nimmt der Bereich der Luftröhre und der Bronchien im Vergleich zu gesunden Erwachsenen vorzugsweise Partikel mit einem kleinen aerodynamischen Durchmesser auf.

Dieser Tatsache wird durch eine weitere Alveolarkonvention für Kranke und geschwächte Personen oder Kinder (Risikogruppe) Rechnung getragen, die auf geringere aerodynamische Durchmesser abzielt.

In Abbildung 2.1 ist die mittlere Wahrscheinlichkeit (Abscheidegrad) für Partikel, in bestimmte Bereiche des Atemtraktes (Nasen- und Rachenraum, Kehlkopf und Bronchien, Alveolen) vorzudringen in Abhängigkeit vom aerodynamischen Durchmesser dargestellt. Der Abscheidegrad der einzelnen Anteile der Partikelgrößenfraktionen ist bezogen auf das gesamte luftgetragene Partikelkollektiv.

Für die wirkungsbezogene Messung von Partikeln müssen Messgeräte eingesetzt werden, die in der Lage sind, die in den Konventionen festgelegten Partikelgrößen selektiv zu messen.

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung ist messtechnisch sehr aufwendig. Es ist deshalb Praxis, die einzelnen Partikelfraktionen durch den Medianwert der Partikelgrößenverteilung anzunähern und diesen als Sammelkriterium und Beurteilungsmaßstab festzulegen.

Aus Abbildung 2.1 ist zum Beispiel ersichtlich, dass der Medianwert der thorakalen Fraktion einen aerodynamischen Durchmesser von ungefähr 10 µm aufweist. Der aerodynamische Durchmesser des Medianwertes einzelner Partikelgrößenfraktionen wird auch als Kurzbezeichnung für einzelne Partikelfraktionen verwendet.

So wird zum Beispiel die thorakale Fraktion auch durch **PM 10** angenähert. Bei der PM 10 Fraktion handelt es sich nicht nur um Partikel, die kleiner als 10 µm sind, wie dies häufig vereinfacht beschrieben wird. Lediglich 50 % der Partikel (bezogen auf die Gesamtmasse) ist kleiner als 10 µm und es können in dieser Fraktion auch Partikel bis zu 30 µm vorkommen. Die alveolengängige Fraktion für die Risikogruppe (Kranke, geschwächte Personen, Kinder) wird durch **PM 2,5** angenähert.

Alle derzeit in Deutschland geltenden Grenzwerte (Immissionswerte und Abgasgrenzwerte) und vorgeschriebenen Messverfahren beruhen auf der Bestimmung der Partikelmasse. Die Messung der Partikelanzahl wird vom Gesetzgeber noch nicht vorgeschrieben..

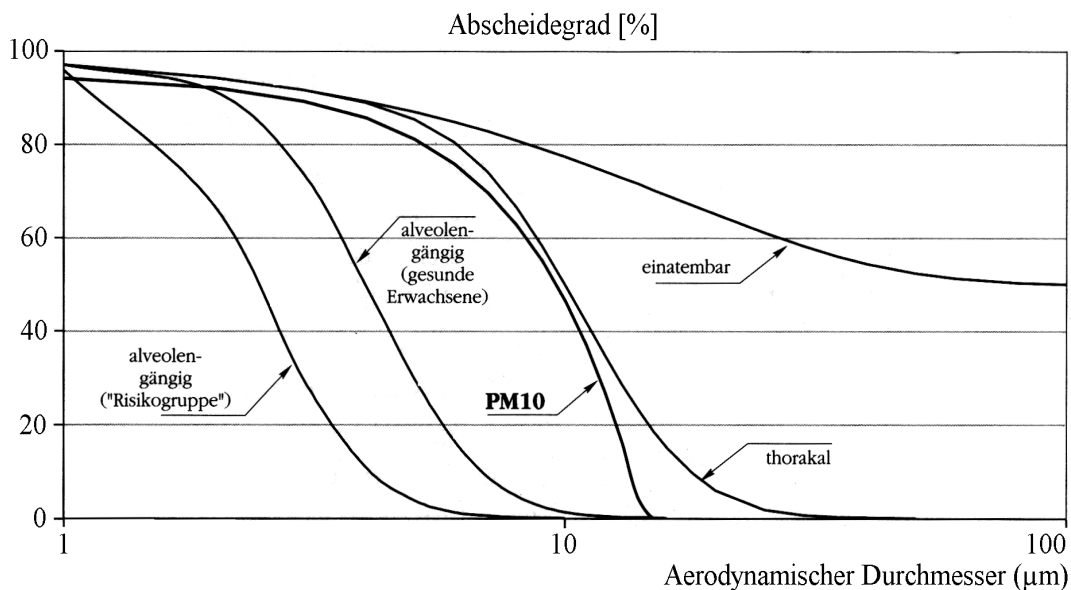


Abbildung 2.1: Mittlere Wahrscheinlichkeit (Abscheidegrad) für Schwebstaub, in bestimmte Bereiche des Atemtraktes vordringen zu können.

2.2. Entstehung von Rußpartikel

Rußpartikel entstehen bei der nicht vollständigen Verbrennung fossiler Brennstoffe. Aufgrund der motortechnischen Gegebenheiten (z.B. inhomogenes Kraftstoff-Luft-Gemisch, unvollständige Verdampfung) und dem höheren Anteil an langkettigen, höhersiedenden Kohlenwasserstoffen im Dieselmotorkraftstoff emittiert der Dieselmotor mehr Partikelmasse als der Ottomotor. Aus den Kohlenwasserstoffen des Kraftstoffs bilden sich während des Verbrennungsvorgangs im Motor zunächst Ethin-Moleküle, die sich zu ein- und mehrringigen aromatischen Kohlenwasserstoffen zusammenschließen. Wird die Anlagerung von Ethin fortgesetzt, so wächst der Kohlenstoffanteil in den Molekülen auf Kosten des Wasserstoffanteils an, bis schließlich graphitähnliche Rußteilchen, sogenannte „Kerne“, entstehen. Diese Kerne, die einen Durchmesser von ca. 1 nm aufweisen, vergrößern sich durch Koagulation (Partikel stoßen aufeinander und bleiben aneinander haften) zu kugelförmigen „Primär-Rußpartikel“ mit einem Durchmesser von 10 nm bis 50 nm. Diese Primärpartikel treten jedoch nicht einzeln auf, sondern ballen sich (Agglomeration) zu losen Ketten mit räumlichen Verzweigungen zusammen, die aus mehreren tausend Primär-Partikel bestehen können. Diese zusammengelagerten Partikel können bis zu mehrere Mikrometer groß werden. Bezogen auf die Gesamtmasse sind jedoch rund 90 % der Partikel kleiner als 1000 nm. Die Hauptmenge der Partikel weist einen Durchmesser von 100 nm auf [Klingenberg, 1995]. Die Bildung von Rußpartikel ist in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt.

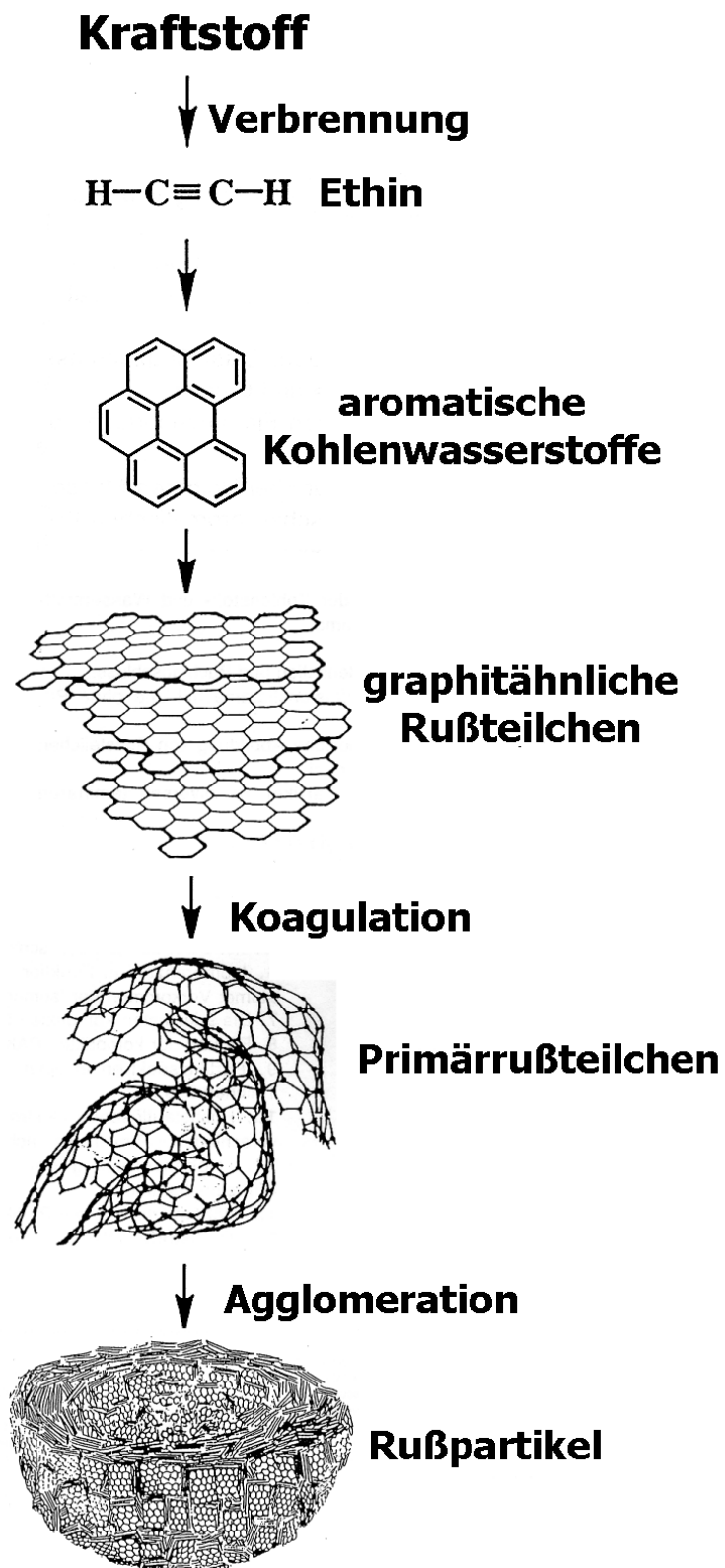


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Bildung von Rußpartikel
[Siegmann K., Siegmann H.C., 1998]

2.3. Stoffliche Zusammensetzung der Rußpartikel

Die durch Koagulation und Agglomeration gebildeten Rußpartikel bestehen aus reinem Kohlenstoff (elementarer Kohlenstoff = Elemental Carbon, EC), der nicht organisch löslich und bis 650 °C stabil ist.

An die Rußpartikel können sich im Abgasstrom des Kraftfahrzeugs weitere Abgaskomponenten anlagern. Dabei kann es sich um Kohlenwasserstoffe (z.B. aliphatische Kohlenwasserstoffe, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe usw.) oder auch um anorganische Bestandteile (z.B. Sulfate, Metalloxide usw.) handeln. Die adsorbierten organischen Kohlenwasserstoffverbindungen werden als organisch löslicher Kohlenstoff (**Organic Carbon, OC**) bezeichnet und die Summe allen Kohlenstoffs als Gesamtkohlenstoff (**Total Carbon, TC**), so dass die Beziehung $TC = EC + OC$ gilt. Die o.g. Bezeichnungen finden vor allem in der Messtechnik Anwendung. Im Bereich der optischen Messverfahren wird der lichtabsorbierende Anteil des Aerosols als schwarzer Kohlenstoff (**Black Carbon, BC**) bezeichnet. Im Idealfall ist $BC = EC$. In Abbildung 2.3 ist die stoffliche Zusammensetzung von Dieseldieselrußpartikeln dargestellt.

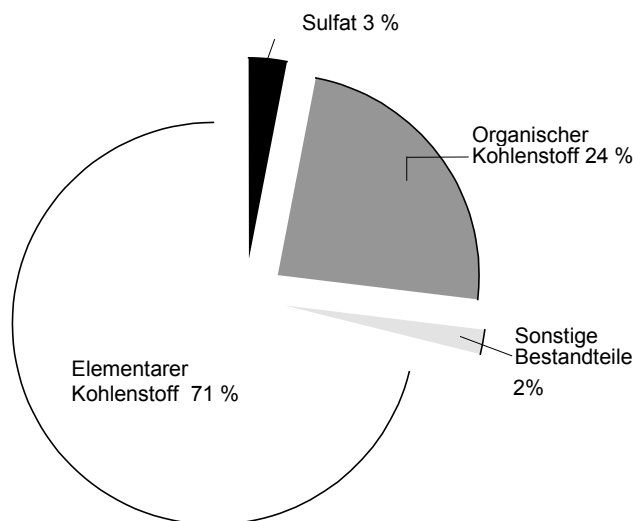


Abbildung 2.3: Beispiel für eine stoffliche Zusammensetzung von Dieseldieselrußpartikel in Gewichtsprozent (Mittelwerte aus Messungen an Volkswagen- und Audi-Personenkraftwagen) [Klingenberg, 1992]

2.4 Partikelgrößenverteilung im Abgas

Die Partikeldurchmesser im Abgas von Kraftfahrzeugen können mit Hilfe von sogenannten insitu-Messverfahren (Untersuchungen der Partikel direkt im Abgasstrom mittels online-Messverfahren) bestimmt werden.

Die typische Partikelgrößenverteilung im Abgas eines Dieselmotors zeigt Abbildung 2.4. Die Hauptanzahl der Partikel weist einen Durchmesser um ca. 100 nm auf und kaum Partikel die größer als 1000 nm sind. Ein völlig anderes Bild zeigt die Partikelmasse und die Partikeloberfläche. Hier bleibt die hohe Anzahl der Partikel kleiner 1000 nm ($=1 \mu m$) unberücksichtigt.

Partikel im Dieselabgas: Anzahl- und Massenverteilung

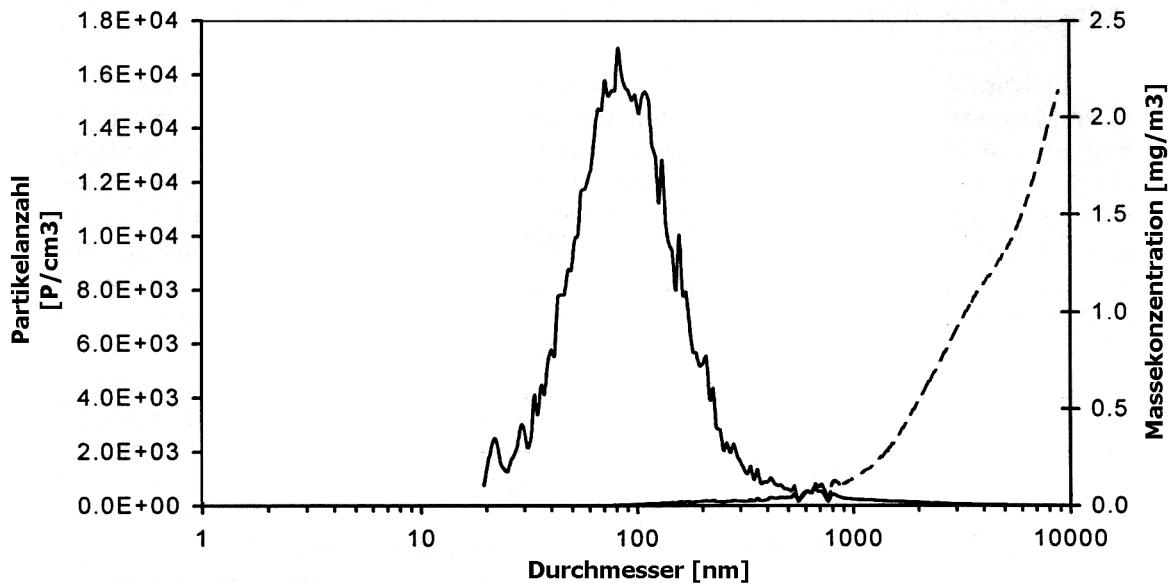


Abbildung 2.4: Typische Partikelgrößen und –massenverteilung im Abgas eines Diesel-Pkw bei konstanter Fahrt (P=Partikel)

Partikeldurchmesser [nm]	Partikelmasse [µg]	Partikeloberfläche [µm ²]
100 nm	$5,2 \cdot 10^{-10}$	0,0314
10000 nm	$5,2 \cdot 10^{-4}$	314

Tabelle 2.1: Masse und Oberfläche von Partikeln mit der Dichte 1 g/cm^3 bei verschiedenen Durchmessern

Aus Tabelle 2.1 ist ersichtlich, dass eine Million Partikel mit einem Durchmesser von 100 nm ebensoviel wiegen wie ein Partikel mit einem Durchmesser von 10000 nm. Die gesamte Partikeloberfläche der einen Million Partikel ist 100-fach größer als die Partikeloberfläche des 10000 nm großen Partikels (bei kugelförmigen Partikel mit der Dichte 1 g/cm^3 gelten folgende Zusammenhänge:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 ; O = 4 \pi r^2$$

3. Motortechnik

3.1 Technik des Dieselmotor

Daimler Benz und MAN brachten Anfang der 20er Jahre die ersten Pkw mit Dieselmotor auf den Markt. Der erste serienmäßige Pkw mit „Selbstzünder“ war der Mercedes 260D von 1936 (4 Zylinder, 2,6 Liter, 45 PS bei 3000 U/min). Im Gegensatz zu den Lkw-Motoren arbeitete er jedoch nicht nach dem Direkteinspritzverfahren, sondern nach dem Vorkammerprinzip. 1951 brachte MAN den ersten deutschen Lkw mit Abgas-Turboladeraufladung auf den Markt. Erst 1989 gelang es AUDI den ersten Pkw als Direkteinspritzer mit Turbolader (TDI) serienmäßig herzustellen.

Prinzipiell wird Luft in den Zylinder angesaugt und durch den Kolben auf einen Druck von 30 - 55 bar (3 - 5,5 MPa) verdichtet und dabei auf 700 - 900 °C erhitzt. Der von der Einspritzpumpe geförderte und durch die Einspritzdüse eingespritzte Dieselmotorkraftstoff entzündet sich bei diesen Temperaturen selbst im Brennraum. Dadurch steigen Druck und Temperatur im Brennraum an, der Kolben wird nach unten gedrückt und leistet Arbeit. Der verwendete Kraftstoff muss eine ausreichende Zündwilligkeit aufweisen, welche mit der Cetanzahl angegeben wird. Zwischen Einspritzbeginn und dem Entzünden des Kraftstoffs vergeht eine bestimmte Zeit, welche als Zündverzug bezeichnet wird. In den Kapiteln 3.1.1 und 3.1.2 werden die verschiedenen Einspritzverfahren unterschieden.

3.1.1 Indirekte Einspritzverfahren (IDI)

Die am häufigsten verwendeten indirekten Einspritzverfahren sind das Vor- oder Wirbelkammerverfahren. Beim Vorkammerverfahren ist der Brennraum unterteilt und der Kraftstoff wird in eine Kammer gespritzt, in der er sich entzündet. Von da aus expandiert der gezündete Kraftstoff in die Hauptkammer und verbrennt dort vollständig. Bei dem Wirbelkammerverfahren bildet sich durch tangentiales Einströmen ein Luftwirbel aus, die Vorkammer ist durch eine oder mehrere relativ kleine Öffnungen mit dem Hauptbrennraum verbunden. Dies führt zu einem geringeren Verbrennungsgeräusch, aber höherem Kraftstoffverbrauch wegen Überströmverlusten.

3.1.2. Direkteinspritzverfahren

Gegenüber den Kammernverfahren ergibt sich eine Kraftstoffeinsparung von 15 %, da der Kraftstoff direkt in den Brennraum gespritzt wird. Jedoch ist die Geräuschentwicklung der herkömmlichen Direkteinspritzer sehr hoch.

Eine Möglichkeit den Kraftstoffverbrauch zu senken und die Abgaskonzentrationen für Stickstoffoxide (NO_x), gasförmige Kohlenwasserstoffe (HC), Partikelmasse (PM), Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2) bei Dieselmotoren zu mindern, ist die Direkteinspritzung unter Hochdruck.

Hierfür werden derzeit zwei Verfahren verwendet:

- **Common Rail - Technik (z.B. Audi, Fiat, Mercedes-Benz, Peugeot)**

Common Rail bedeutet gemeinsame Leitung, gemeint ist damit die gemeinsame Kraftstoffleitung zu den Zylindern. Es werden alle Zylinder über eine Hochdruckleitung und einer Hochdruckpumpe, die den Kraftstoff auf 135 MPa (=1350 bar) verdichtet, versorgt. Sehr schnell schaltende Magnetventile dosieren in den Einspritzdüsen für jeden Zylinder die Kraftstoffmenge nach Bedarf. Aufgrund der präzisen elektronischen Steuerung der Injektoren ermöglicht die Common-Rail-Hochdruck-Direkteinspritzung eine Kraftstoff-Piloteinspritzung (minimale Voreinspritzung vor der eigentlichen Injektion), die einen weichen, progressiveren Verbrennungsverlauf bewirkt und die Geräuschentwicklung des Motors im Leerlauf um 3 dB reduziert. Ein Einspritzdruck von mehr als 200 MPa wäre wünschenswert, da dann die Verbrennung nahezu rauchfrei abläuft.

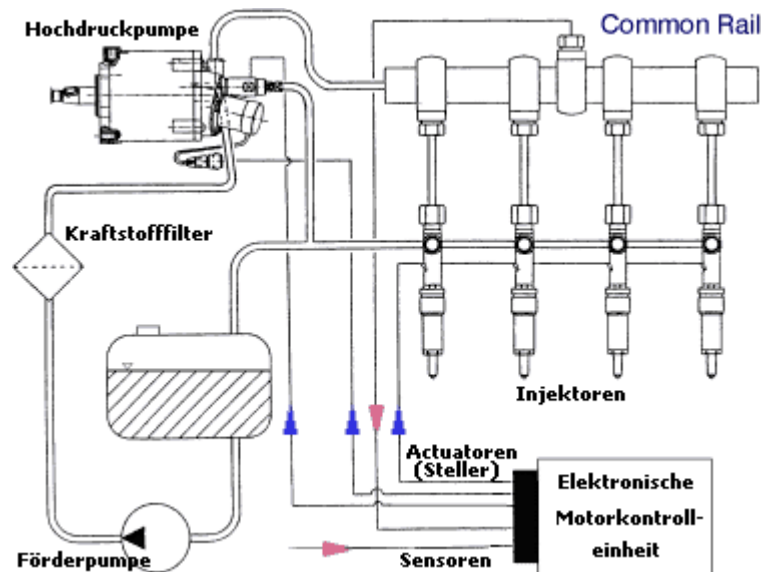


Abbildung 3.1: Aufbau eines Direkteinspritzsystems mit Common Rail [Guarassi N., 1998]

- **Pumpe-Düse System (Volkswagen)**

Jede Einspritzdüse wird mit einer Hochdruckverteilerpumpe (z.B. Bosch) zu einer Einheit für jeden Zylinder gekoppelt, die 205 MPa erzeugen kann. Jeder Pumpenkolben wird direkt von der Nockenwelle angesteuert. Die Einspritzung wird über die Elektronische Kontrolleinheit durch ein Magnetventil ausgeführt. Im Geräuschverhalten verhält sich dieser Motor fast wie ein Benziner.

Zur besseren Übersicht sind die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren tabellarisch aufgeführt:

Verfahren	Verwendung	Anwender	Vorteil	Nachteil
Einspritzung mit getrennten Kammern				
Vorkammer Wirbelkammer	alt, Pkw,		Geräuscharm	Erhöhter Kraftstoffverbrauch
Direkteinspritzung				
Verteiler- einspritz-pumpe	Lkw, Busse		Bewährte Technik Spritzbeginnregelung möglich	Einspritzdruck nicht frei wähl- bar. Voreinspritzung zur Minimie- rung der Geräuschemission nur begrenzt möglich. Nacheinspritzung zur Regene- rierung von Filtersystemen nicht möglich stärkere Geräuschemission
Common-Rail	neu, Pkw, (seit ca. 1997)	AUDI, Fiat, Mercedes- Benz, Peu- geot, Re- nault	Freier Vor- und Haupt- spritzbeginn. Freier Einspritzdruck im gesamten Kennfeld. Nahezu konstanter Druck während der gesamten Einspritzung, der bereits bei Einspritzbeginn an- liegt. Einfache Applikation am vorhandenen Motor mög- lich. Option zur frei wählbaren Nacheinspritzung.	Höhe des verfügbaren Sys- temdruckes liegt derzeit bei max. 1350 bar
Pumpe-Düse	neu, Pkw, (seit ca. 1997)	VW,	Hoher Spitzendruck. Voreinspritzung möglich. Schnelles Nadelschlie- ßen.	Hoher konstruktiver Aufwand Packaging/ Bauraum Einspritzdruck nicht frei wähl- bar Ungleichförmigkeit des An- triebsmomentes der Pumpe- Düse Elemente nur für Fahrzeuge bis max. 4 Zylinder geeignet

Tabelle 3.1: Vergleich der unterschiedlichen Einspritzverfahren bezüglich ihrer Vor- und Nachteile
[20. Wiener Motorensymposium, Krämer, 1999]

3.2 Weitere Motorseitige Entwicklungen zur Emissionsverringern

Elektronische Motorkontrolle

Ende der achtziger Jahre begann der Einsatz der elektronischen Motorkontrolle im Bereich der leichten und schweren Nutzfahrzeuge. Folgende Probleme beim Dieselmotor konnten so besser bewältigt werden:

- Kaltstart
- Regelung der motortechnischen Parameter
- vorübergehende Rauchemissionen

Zusätzlich wurde das System um die Emissionskontrolleinheit, das Kraftstoffsystem und die Luftansaugung erweitert. So kann ein schneller Motorverschleiß und hohe Schadstoffemissionen vermieden werden.

Das System besteht aus Sensoren, Mikroprozessoren und Stellmotoren. Die Sensoren messen physikalische Größen wie Kurbelgeschwindigkeit oder Einlassventiltemperatur und -druck, und geben die Information in Form elektrischer Signale an den Controller weiter, der über Stellmotoren beispielsweise die Abgasrückführung und die variable Geometrie des Turboladers steuert.

Verbesserung der Verbrennung im Brennraum durch verbesserte Drallsteuerung

Ziel ist eine gute Durchmischung von Dieselmotorkraftstoff und Luft, um eine möglichst vollständige Verbrennung zu erreichen. Stärkere Turbulenzen in der Brennkammer und dadurch eine bessere Gemischbildung werden durch die exzentrische Verschiebung des Injektors zur Brennkammermulde erzielt.

Zeitpunkt der Kraftstoffeinspritzung

Der Zeitpunkt der Einspritzung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Verbrennung und die daraus resultierenden Emissionen. Alle wichtigen motortechnischen Parameter, wie spezifischer Kraftstoffverbrauch, Emissionen an Stickstoffoxiden, Partikel, Kohlenwasserstoffe und der Zylinderdruck (wird durch den Turbolader gesteuert), sind eine wichtige Funktion des Injektionszeitpunktes. In Abbildung 3.2 ist die Partikelanzahl und der Partikeldurchmesser in Abhängigkeit vom Injektionszeitpunkt dargestellt.

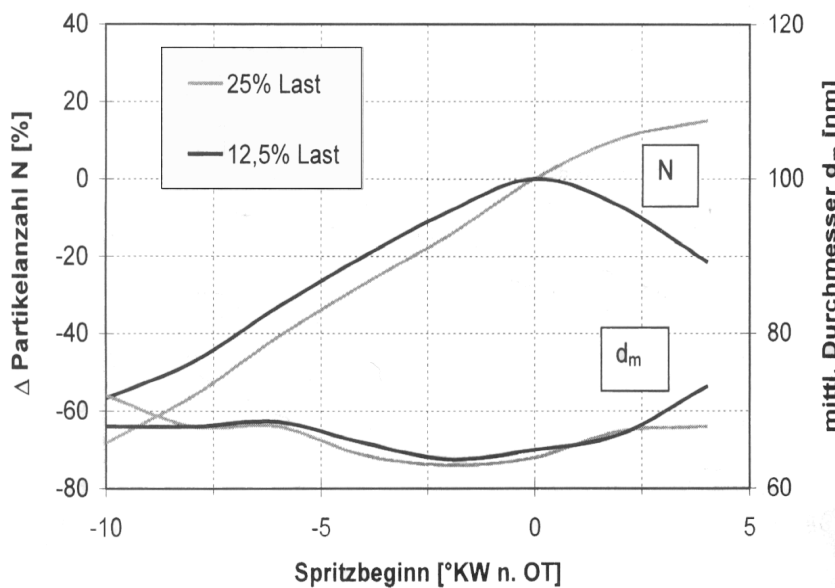


Abbildung 3.2: Einfluss des Spritzbeginns auf Partikelanzahl und -durchmesser bei $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ und 12,5 % bzw. 25 % Last [Buchsbaum A. 1999]

Zündzeitpunkt und Einspritzdruck

Verspätete Zündung führt zu verringertem Stickstoffoxide-Ausstoß, aber höherem Kraftstoffverbrauch und verstärkter Emission an Kohlenwasserstoffen und Partikel. Dem kann mit erhöhter Kompressionsrate und höherem Injektionsdruck entgegengewirkt werden. Dabei kann der Ausstoß an Partikel von 28 g/h bei einem Einspritzdruck von 35 MPa auf 18 g/h bei einem Einspritzdruck von 50 MPa reduziert werden (gemessen an einem leichten Nutzfahrzeug Ford 2.5 DNA bei einer Motordrehzahl von 3000 U/min). Dies ist in der Abbildung 3.3 dargestellt.

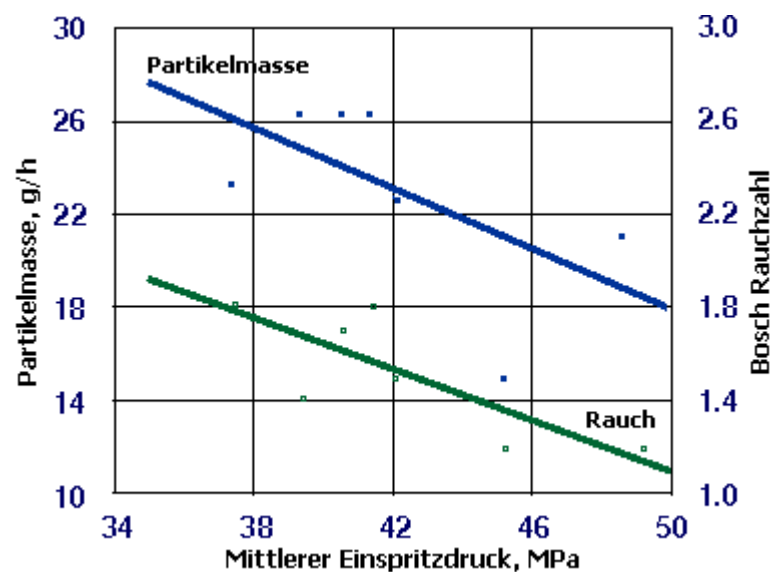


Abbildung 3.3: Darstellung der Abnahme der Partikelmasse und Bosch Schwärzungs- bzw. Rauchzahl bei Anstieg des Injektionsdrucks [Hawley J.G., 1998]

Leistungserhöhung durch Aufladungstechniken mit dem Abgasturbolader

Praktisch alle Diesel-Pkws sind seit Anfang der Neunziger Jahre mit einem Turbolader ausgerüstet. Durch ihn wird die Verbrennungsluft vorverdichtet, was zu einer Leistungssteigerung führt. Diese Vorrichtung erlaubt es, über den Druck am Ladedruckregelventil den Fluss der Ladeluft in den Motorzylinder zu kontrollieren.

Des Weiteren wird die Verdichtung der Luft erhöht und damit der Sauerstoffeintrag in die Brennkammer. Dies führt ab einer Luftverhältniszahl von 1,7 zu einer Erniedrigung der Stickstoffoxid- und Partikelkonzentrationen.

- Variable Geometrie des Turboladers

Der Strömungsquerschnitt der Turbine wird in Abhängigkeit vom momentanen Motorbetriebsdruck verändert und auf diese Weise der jeweils optimale Ladedruck entwickelt. Durch die dynamische Verstellung wird die gesamte Abgasenergie optimal genutzt und ein guter Wirkungsgrad über einen breiten Kennfeldbereich erzielt. Dadurch wird weniger Hubraum in den Zylindern benötigt und die Motoren benötigen 20 - 30 % weniger Energie als herkömmliche Saugmotoren mit vergleichbarer Leistung. Die Ladeluftkühlung am Turbolader führt zu einer besseren Verbrennung im Zylinder und geringeren Abgaswerten.

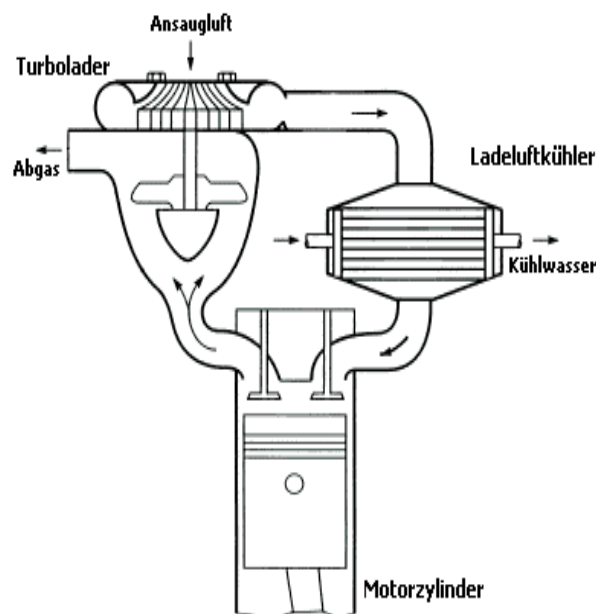


Abbildung 3.4: Darstellung des Regelkreises Turbolader, Kühler, Motorzylinder, Abgas [Charlton S.L., 1998]

Abgasrückführung (AGR)

Die Rückführung eines Teils des Abgases in den Brennraum ist eine wirkungsvolle Maßnahme um die Stickstoffoxid-Bildung im Motor zu vermindern. Nachteilig ist dagegen die Erhöhung der Rußbildung und damit die Partikelemission. Man unterscheidet zwei Arten der Abgasrückführung:

- mit niedrigen Abgasrückführungsraten im Bereich hoher Motorlasten
- mit hohen Abgasrückführungsraten im Schwachlast-Zustand.

Beim Pkw ist der Schwachlastbereich dominierend. Bei den Nutzfahrzeugen wird jedoch vorwiegend mit Volllast gefahren. Daher ist die Abgasrückführung bei den Lkws nicht die geeignete Methode zur Reduzierung der Partikelanzahl und der Stickstoffoxide.

Leider führen bei Dieselmotoren Maßnahmen, die eine Reduzierung der Stickstoffoxid-Emissionen bewirken, im allgemeinen zu einer Erhöhung der Partikelmasse-Emissionen (und umgekehrt). Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 3.5 deutlich, die eine vergleichende Gegenüberstellung der Stickstoffoxid- und Partikel-Emissionen bei unterschiedlichen Motortechnologien aufzeigt:

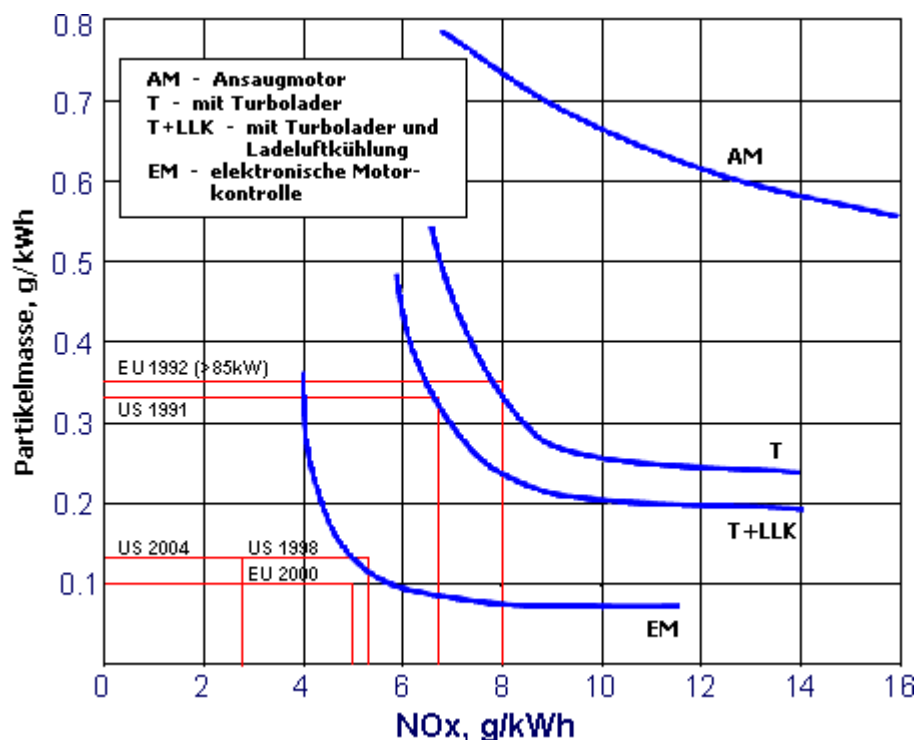


Abbildung 3.5: Vergleichende Gegenüberstellung von Stickstoffoxid (NO_x) - und Partikel-Emissionskennlinien (Trade-Off-Linie) bei schweren Nutzfahrzeugen [Needham J., 1991]

Die blauen Kurven veranschaulichen den Rückgang an Stickstoffoxid (NO_x) - und Partikel-Emissionen, die von verschiedenen Motortechnologien erreicht werden können. Die roten Linien sind ausgewählte Emissionsstandards für Lkw-Motoren in den USA und Europa. Die entsprechenden Kennlinien für leichte Nutzfahrzeuge, -hier nicht dargestellt-, zeigen eine ähnliche Charakteristik. Innerhalb jeder Motortechnologie können niedrigere NO_x -Emissionen erzielt werden, der Preis dafür sind jedoch erhöhte Partikel-Emissionen. Neu entwickelte Motortechnologien (wie die direkteinspritzenden Diesel) bilden Linien nahe am Ursprung des Plots. Zum Beispiel sind die NO_x - und Partikelmasse-Emissionen für Motoren mit Turbolader geringer als bei Ansaugmotoren. Weitere Emissionsreduzierungen wurden durch die Einführung von Dieselmotoren mit Turbolader und Ladeluftkühlung erreicht sowie der elektronischen Motorsteuerung und einiger Verbesserungen im Verbrennungsprozess.

Früher setzte man alleine auf die verbesserte Partikelfiltertechnologie und versuchte den Verbrennungsprozess so zu steuern, dass möglichst wenig NO_x dabei entstanden. Die Mehrbildung an Partikel sollte über die Filter zurückgehalten werden. Heute, bedingt durch die neuen Kennlinien der ein-

zelenen Motortechnologien, ist zu erkennen, dass eine weitere Reduzierung der NO_x einen sehr steilen Anstieg der Partikelmasse nach sich zieht. [Boer, 1997]

On-Board Diagnose (OBD)

Dieses System erlaubt die Anzeige der fehlerhaften Funktion einzelner Abgasreinigungseinheiten wie Katalysator, Partikelfilter sowie Fehlfunktionen des Motors, wie Verdunstungsemissionen oder Fehlzündungen des Motors. Dieses Kontrollsystem ist in den USA für leichte Nutzfahrzeuge (Diesel, Benzin oder alternative Kraftstoffe) bereits vorgeschrieben. In Europa soll es ab dem Jahr 2000 für leichte Nutzfahrzeuge und ab 2005 für schwere Nutzfahrzeuge eingeführt werden.

In der Tabelle 3.2 sind die Auswirkungen der motorseitigen Maßnahmen ,und einiger anderer, auf die Emission von Kraftfahrzeugen zusammenfassend dargestellt.

Technologie	Beeinflusste Parameter			
	NO_x	HC	PM	Rauch
Primäre Motortechnologie				
Turbolader	↑↑		↑↑↑	↑↑↑
Ladeluftkühlung	↑↑↑			
Kompressionsrate		↑↑		↑
Brennraumdesign		↑↑	↑↑	↑↑
Verwirbelungsgrad Luft-Diesel			↑↑	↑↑
Design der Injektionsnadel	↑↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Einspritzdruck	*	↑↑	↑↑	↑↑
Einspritzzeitpunkt	↑↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Elektronische Kontrolle	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Kontrolle des Schmieröls		↑↑	↑↑	↑↑
reformulated (von der Zusammensetzung her optimierte) Kraftstoffe	↑	↑	↑↑↑	↑↑
Wasser-Diesel-Emulsion	↑↑↑	↑	↑↑	↑
Wasser oder Ammonium Einspritzung	↑↑↑			
Abgasrückführung	↑↑↑	↑	↓↓	↓
Sekundäre Technologie				
Abgasnachbehandlung	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑

↑ geringer Einfluss ↑↑ starker Einfluss ↑↑↑ sehr starker Einfluss

Tabelle 3.2: Auswirkungen von Maßnahmen auf die Reduktion der Emissionen von Kraftfahrzeugen [Sher E., 1998]

4. Dieselmotorkatalysatortechnik

Die Dieselmotoren sind in Europa seit 1996 fast alle mit einem Oxidationskatalysator ausgerüstet. Diese heutigen Dieselmotorkatalysatoren wurden zur Reduzierung der gasförmigen Kohlenwasserstoffe (HC) entwickelt. Dabei wird auch der Anteil der organisch löslichen Kohlenwasserstoffe (OC) an der Gesamtpartikelmasse mit einem hohen Wirkungsgrad oxidiert. Die Fraktion des elementaren Kohlenstoffs, die Dieselmotorkerne, werden im Katalysator nicht reduziert. Daher hängt der Grad der Reduktion vom OC-Anteil des Abgases ab.

Die Oxidation von Schwefeldioxid (SO_2) zu Schwefeltrioxid (SO_3) ist eine unerwünschte Reaktion, welche die Gesamtpartikelmasse durch Bildung von Sulfatpartikeln erhöht. Das grundsätzliche Problem bei der Entwicklung eines Katalysators ist die selektive Oxidation der gasförmigen Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und der organisch löslichen Partikel-Fraktion ohne Bildung von SO_3 . Die Leistungsfähigkeit eines Katalysators in der Reduzierung der Gesamtpartikelmasse hängt von folgenden Parametern ab:

- Schwefelgehalt im Kraftstoff
- der Gehalt der OC-Fraktion an der Gesamtpartikelmasse
- Abgastemperatur (Katalysatorlokalisierung, Testzyklus)
- Edelmetallsystem, Katalysatorzusammensetzung
- Volumen und Zelldichte des Katalysators

Je höher die Temperatur, desto vollständiger verläuft die Oxidation von Kohlenwasserstoffen, aber auch die Bildung von Sulfatpartikeln.

Der Testzyklus ECE+EUDC für europäische Fahrzeuge ist durch niedrige Temperaturen unter 300 °C charakterisiert. Die Sulfatbildung, als Anteil an der Gesamtpartikelmasse, kann hier gut kontrolliert werden. Der US „*heavy-duty-transient cycle*“ (HDT) zur Zertifizierung für Lkws und Busse in den USA wird bei einer durchschnittlichen Temperatur von 350 °C durchgeführt, wobei eine Kontrolle über die Bildung der Sulfat-Partikel schwierig ist. Während des ECE R-49 Tests zur Zertifizierung von Lkws in Europa werden Abgastemperaturen von bis zu 500 °C erreicht. Dies macht eine Verhinderung der verstärkten Bildung von Sulfat-Partikel nahezu unmöglich. Die Leistungsfähigkeit dreier Katalysatoren [Smedler, 1995] mit abnehmender oxidativer Wirkung bei drei unterschiedlichen Testzyklen ist in der Abbildung 4.1 dargestellt.

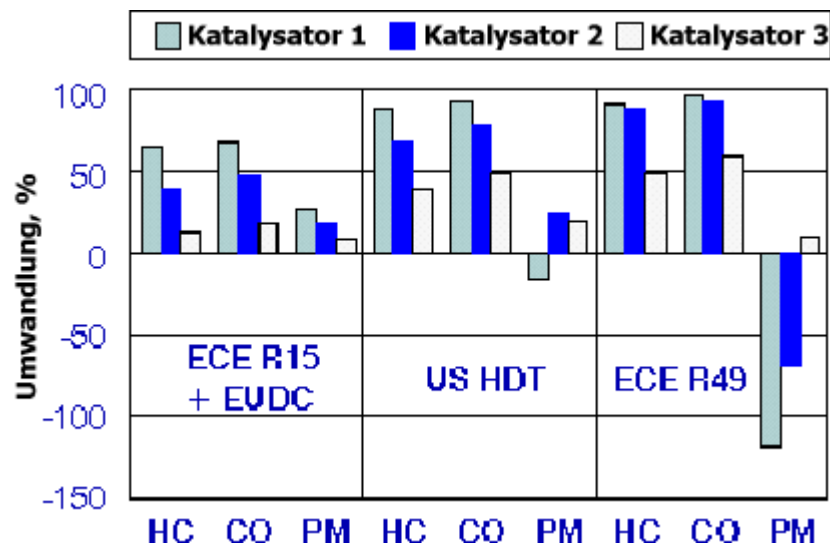


Abbildung 4.1: Darstellung des Reduktionspotentials [%] an Kohlenwasserstoffen (HC), Kohlenmonoxid (CO) und Partikelmasse (PM) dreier Katalysatoren in unterschiedlichen Fahrzyklen

Die Katalysatoren bestehen aus dem Pt/Al₂O₃ System mit einem Additiv auf Metalloxidbasis zur Unterdrückung der Sulfatbildung. Katalysator 1 mit der geringsten Selektivität kann die PM-Emissionen unter ECE+EUDC-Bedingungen am besten kontrollieren, bildet jedoch beim ECE-R49-Testzyklus die höchste Menge an Sulfaten (dargestellt in der negativen Umwandlungsrate [%]). Nur der Katalysator 3 mit dem geringsten oxidativen Potential reduziert im ECE-R49-Zyklus geringfügig die Gesamtpartikelmasse. Jedoch zeigt sich auch, dass mit abnehmender oxidativer Aktivität der Wirkungsgrad bei der Oxidation von HC und CO abnimmt.

Die Ergebnisse im ECE R-49 Testzyklus zeigen, wie wichtig die Einführung von schwefelarmem Dieselmotoren und schwefelreduziertem Schmieröl ist.

Platin ist zur Oxidation der OC-Fraktion nicht notwendig, aber zur Oxidation der gasförmigen Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxids. Dies zeigen anschaulich die nächsten Abbildungen 4.2 und 4.3

Die Katalysatoren S4, S5 und S6 enthalten 0, 0,5 und 2 g/ft³ Platin.

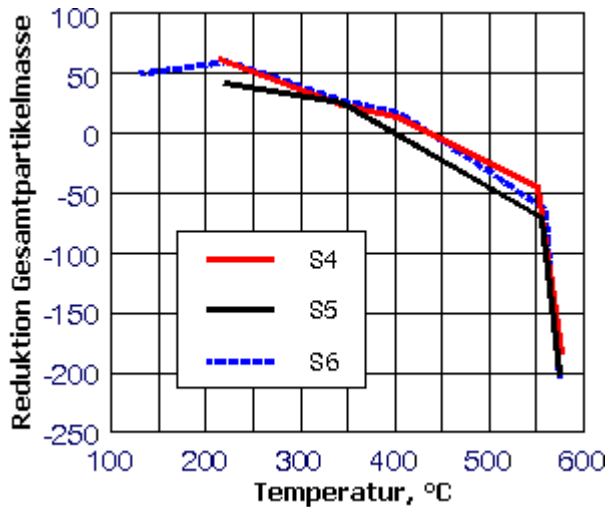


Abbildung 4.2: Effekt der Pt-Beladung auf die Reduzierung der Gesamtpartikelmasse phase

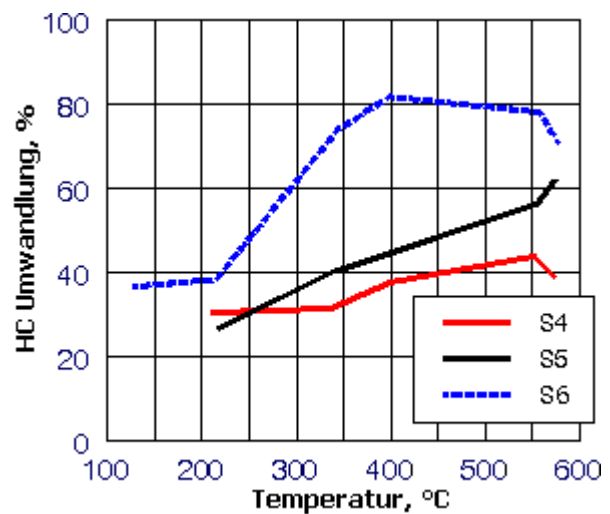


Abbildung 4.3: Effekt der Pt-Beladung auf die Oxidation und Reduzierung von HC aus der Gasphase

Die Abbildung 4.2 zeigt deutlich, dass selbst der Katalysator S4 ohne Platinanteil bei hohen Temperaturen einen hohen Anstieg der Gesamtpartikelmasse bewirkt, die durch die SO₄-Bildung entsteht. Aus Abbildung 4.3 ergibt sich, dass S4 maximal 40 % der Kohlenwasserstoffe oxidiert, während S5 bis zu 60 % und S6 sogar 80 % der Kohlenwasserstoffe aus der Gasphase entfernt und das bereits bei einer Temperatur von 400 °C.

Bedingt durch die niedrigen Abgastemperaturen beim Pkw ist die Sulfatbildung dort kein Problem. Die Dieseldieselskatalysatoren für Pkw beinhalten eine hohe Platinkonzentration mit V₂O₅ und Rh als Sulfatinhibitoren.

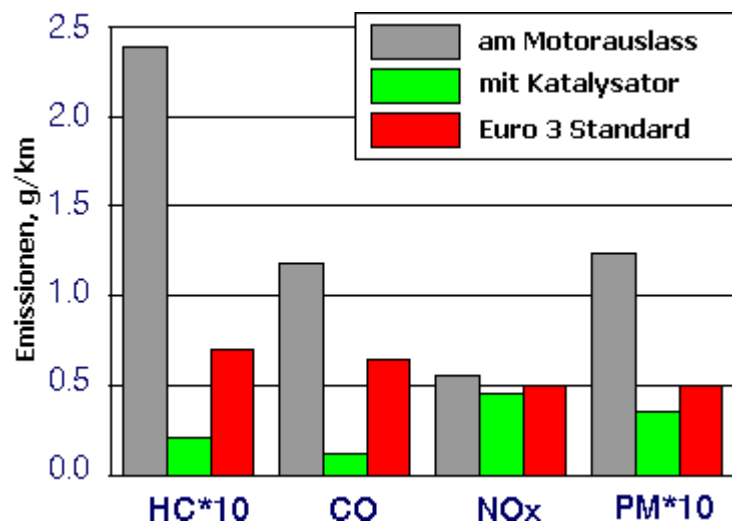


Abbildung 4.4: Vergleich der Abgaswerte direkt am Motorausgang und nach dem Katalysator eines Diesel-Pkw mit den EURO 3-Grenzwerten [Kharas K.C., 1998]

Die Pt/Al₂O₃-Katalysatortechnologie ist auch auf die NO_x-Reduktion hin optimiert worden. Die in Europa erhältlichen Katalysatoren weisen ein Reduktionspotential für NO_x von bis zu 15 % auf. In der Abbildung 4.4 sind die Emissionen eines Pkw-Motors ohne und mit Pt/Al₂O₃-Kat dem EURO 3-Standard gegenübergestellt. Im ECE + EUDC-Zyklus ergaben sich folgende Reduktionen: HC -92%, CO -90%, NO_x -19%, PM (OC, lösliche Kohlenwasserstoff-Fraktion) -71 %. [Kharas K.C., 1998].

Neben dieser Art von Katalysator sind auch Katalysatoren auf Zeolithbasis (bei Zeolith handelt es sich um ein Mineral) auf dem Markt. Daimler-Chrysler verwendet eine Beschichtung von Zeolith-Kristallen, Platin und Aluminiumoxid auf Keramik.

In der Abbildung 4.5 ist die Gesamtpartikelmasse emittiert von einem nicht selektiven Oxidationskatalysator bei Verwendung dreier unterschiedlicher Dieselmotoren mit Schwefelgehalten von 25, 500 und 1500 ppm aufgetragen. Um die Graphik nicht zu überfrachten, wurde auf eine detaillierte Darstellung, aufgeteilt in die drei Fraktionen (OC, EC, Sulfat), verzichtet. Bei 130 °C ist die Hauptkomponente der Partikel die SOF-Fraktion, oberhalb von 400 °C bestehen die Partikel hauptsächlich aus Sulfat. Die Fraktion des elementaren Kohlenstoffs (EC) war, unabhängig von der Katalysatortemperatur, niemals höher als 0,01 g/kWh.

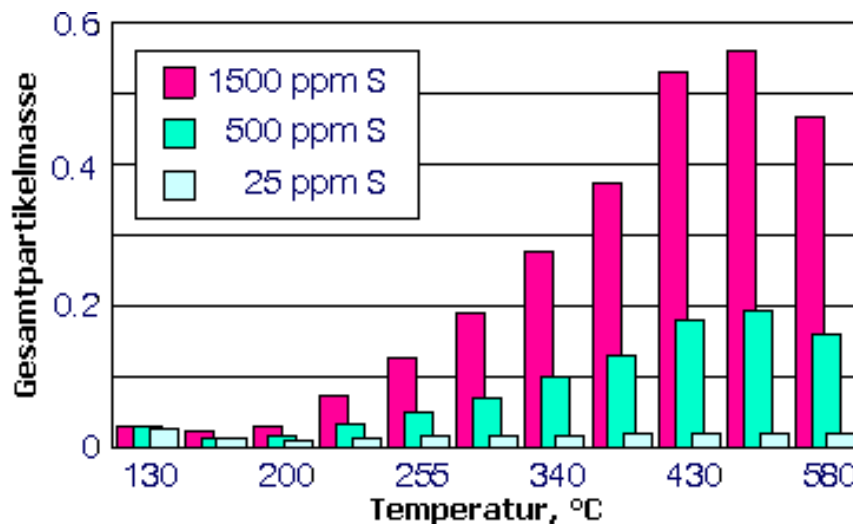


Abbildung 4.5: Emission der Partikelmasse in Abhängigkeit von Abgastemperatur und Schwefelgehalt im Dieselmotoren

5. Filtertechnik

5.1. Mechanismus der Partikelfiltration

Die grundlegende Aufgabe bei jedem Filtertyp ist die Trennung der Partikel vom Gasstrom durch Abscheidung der Partikel an der Oberfläche. Zur Trennung durchströmt das Gas eine poröse Barriere, welche die Partikel zurückhält.

Die Filter können in zwei Kategorien eingeteilt werden:

(1) Tiefenbett-Filter

Hier ist der durchschnittliche Porendurchmesser größer als das Partikel, was dazu führt dass das Partikel in den Filter eindringt und dort nach verschiedenen Mechanismen abgeschieden wird.

(2) Oberflächen-Filter

Im Oberflächen-Filter ist der Porendurchmesser kleiner als der Partikeldurchmesser. Die Partikel werden durch Sieben ausgefiltert und bilden auf der Filteroberfläche einen „Filterkuchen“.

Diese beiden Typen werden in nachfolgender Abbildung gezeigt:

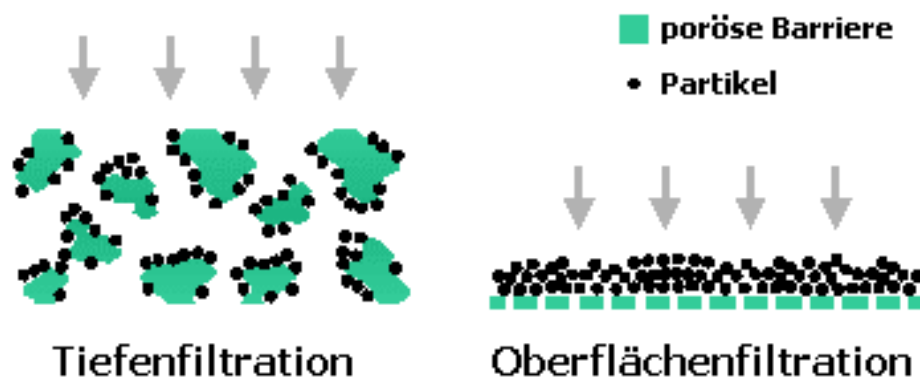


Abbildung 5.1: Typen der Filtration

Die Oberflächenfiltration wird bei den Partikelfiltern nicht angewandt, ein Filterkuchen kann sich jedoch auch bei der Tiefenfiltration während der Filtration bilden. Dies ist unerwünscht, da ein Filterkuchen den Gegendruck erhöht und das Gas nicht ungehindert durch den Filter strömen kann.

Die Tiefenfiltration beruht auf drei Mechanismen:

- Abscheidung durch Diffusion
- Abscheidung durch Trägheit
- Abscheidung durch Brownsche Molekularbewegung

Die Leistungsfähigkeit von Partikelfiltern wird als Filtrationseffizienz oder Durchbruch angegeben.

- Die Filtrationseffizienz gibt den prozentualen Anteil der auf dem Filter abgeschiedenen Partikelmasse an.
- Der Durchbruch gibt den prozentualen Anteil der Partikelmasse an, die vom Filter nicht zurückgehalten wurde.

5.2 Grundsätzliche Anforderungen

Filter-Systeme müssen im gesamten Bereich der Partikelgrößen möglichst hohe Abscheidegrade aufweisen. Werte über 99% werden von Systemen nach neuestem Stand der Technik erreicht. Wenn es mit solchen Partikelfiltern gelingt, weitere Schadstoffe, insbesondere die kanzerogenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), über die Bindung an die Partikeloberfläche zu beseitigen, so wertet dies das Filtersystem auf. In jedem Fall muss sichergestellt werden, dass mit der Einführung des filtrierenden Abgasnachbehandlungssystems keinerlei zusätzliche Schadstoffe (Sekundäremissionen) auftreten. Dies ist keineswegs selbstverständlich, wie Erfahrungen mit metallischen Kraftstoff-Additiven gezeigt haben. Weiter ist zu fordern, dass sich in der Betriebsweise der Filter, die meist durch lange Rußsammelzeiten und kurze Abbrandphasen gekennzeichnet ist, keine Emissionsspitzen ergeben, wie dies bei schnellen Regenerationen mit Phasen unvollkommener Verbrennung oder Filterdurchbruchs-Tendenz beobachtet wurde. Als zusätzliche Bedingung gilt, dass diese Filter nur einen geringen Gegendruck aufbauen dürfen, um den motorischen Prozess nicht nachteilig zu beeinflussen - was sich in einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs, Erhöhung von Schadstoffemissionen oder auch einer Verkürzung der Lebensdauer auswirken könnte. Daneben sind zahlreiche praktische Aspekte wie Baugröße, Gewicht, thermische Trägheit, Schalldämpfung, Oberflächentemperatur und schließlich die Investitions- und Betriebskosten sowie der Service-Aufwand von entscheidender Bedeutung, um die Einführung einer derartigen Abgasnachbehandlungs-Technologie zu sichern.

Im Zuge der Praxiserprobung müssen das Regenerations- und Alterungsverhalten im realen Fahrbetrieb überprüft werden.

Schließlich ist eine periodische Kontrolle der Filter-Systeme im praktischen Einsatz zwingend und muss geeignet sein, die wesentlichen Leistungskriterien unter Feldbedingungen zuverlässig zu überprüfen.

Folgende Anforderungen werden an ein Filtersystem gestellt:

- hohe Filtrationsrate (gravimetrisch gemessen) sowohl beim gleichmäßigen Fahren als auch während des Beschleunigungsvorganges
- möglichst geringer Durchschlag kleiner Partikel ($< 0.1 \mu\text{m}$)
- minimale Bildung von Sulfat
- kein Anstieg von gasförmigen Emissionen (CO , HC , NO_x ,...) oder sekundärer Emissionen (Dioxine,...)
- niedrige zusätzliche Ascheemissionen
- niedriger Faserverlust
- akzeptabler Druckverlust, (Durchschnitt, Maximum)

Weiterhin sind zu betrachten:

- tatsächliche Lebensdauer
- Reinigungs- Service-Intervall
- Gesamtinvestitionskosten
- Instandhaltungskosten

Die umfangreichen Untersuchungen von Baumaschinen im Rahmen des VERT-Projektes (Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau) 1993 - 1998 [VERT 1-10] haben zu dem Ergebnis geführt, dass Partikelfilter derzeit als die einzige effiziente Lösung zur nachhaltigen Minderung der Diesel-Partikelemission angesehen werden müssen. Insbesondere wurde auch der Nachweis geführt, dass solche Filter in der Lage sind, Submikron-Partikel im Größenbereich erhöhter Lungengängigkeit zu mehr als 99% abzuscheiden. Damit kann dem Minimierungsgebot für krebserzeugende

Schadstoffe im Bereich des Arbeitnehmerschutzes und der Luftreinhaltung wesentlich besser Rechnung getragen werden als mit allen anderen bekannten Maßnahmen.

Mit dem Nachweis, dass der Einsatz der getesteten Filter "technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist", gelten sie als "Stand der Technik". Dieser Stand der Technik, insbesondere die Verfügbarkeit praxiserprobter Filter-Systeme, wurde im Rahmen des VERT-Projektes unter Mitwirkung zahlreicher Industriepartner gründlich geprüft und im VERT-Pflichtenheft umschrieben; er muss im Einzelfall durch den VERT-Eignungstest nachgewiesen und vom UBA Berlin bestätigt werden. Gerade in jüngster Zeit sind wieder Vorschläge bekannt geworden, wobei neben der reinen Filtration auch die Zielsetzung der Kombination von Filtration und Oxidationskatalyse oder Filtration und Entstickungskatalyse oder sogar eine direkte thermische Umsetzung ohne Filtersystem verfolgt wird [VERT 1-10]. Je höher die Filter-Temperatur ansteigt, desto mehr geht die lösliche organische Fraktion (OC) in die Dampfphase über. Daher kann die Leistungsfähigkeit eines nicht katalytischen Filtersystems in Bezug auf die SOF-Fraktion mit steigender Temperatur sinken. Einige Filtersysteme beinhalten einen Oxidationskatalysator, um die Rußverbrennungstemperatur herabzusetzen und die Filterregenerierung zu erleichtern. Die katalytischen Filtersysteme sind effektiver in Bezug auf die Entfernung der OC-Partikel aus dem Abgasstrom.

Allerdings können im Katalysator Sulfat-Partikel gebildet werden, vor allem bei erhöhten Temperaturen und in Verbindung mit einem Dieselmotorenstoff, der einen hohen Anteil an Schwefel enthält.

Die nachstehend beschriebenen Filtersysteme sind zum Abscheiden von flüssigen Aerosolen und festen Partikel geeignet.

5.2.1 Partikelfilter – passive Systeme (nicht regenerierbar)

Wandstrom-Monolith

Diese Wandstrom-Monolithen sind die weit verbreitetste Art von Partikel-Filtern. Die Kanäle sind wechselweise an jedem Ende geschlossen, um die Dieselaerosole zu zwingen die porösen Wände zu durchdringen. Dadurch fungieren die Wände als Filter.

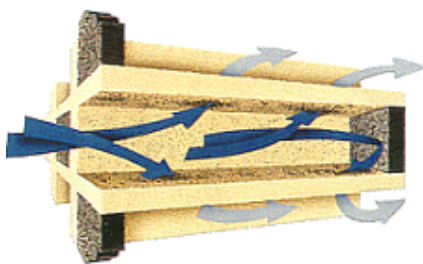


Abbildung 5.2.1.1: Strömung durch einen Monolith-Filter

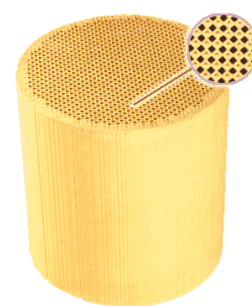


Abbildung 5.2.1.2: Darstellung der Kanäle im Filter

Bei Monolith handelt es sich um eine synthetische Keramik, die für Katalysatoren entwickelt wurde. Sie zeichnet sich durch thermische Stabilität (ca. 1200 °C) und geringe Ausdehnung aus. Der Filtrationsmechanismus ist eine Kombination aus Tiefen- und Oberflächenfiltration. In der Startphase überwiegt die Tiefenfiltration, die Partikel werden in dem porösen Material abgeschieden. Mit steigender Filterbeladung bildet sich dann eine Schicht auf der porösen Oberfläche. Diese fungiert als Filterkuchen.

Diese Keramikfilter zeichnen sich durch hohe Abscheideraten von mehr als 90 % aus. Das Zellsystem erlaubt eine sehr kompakte Bauweise.

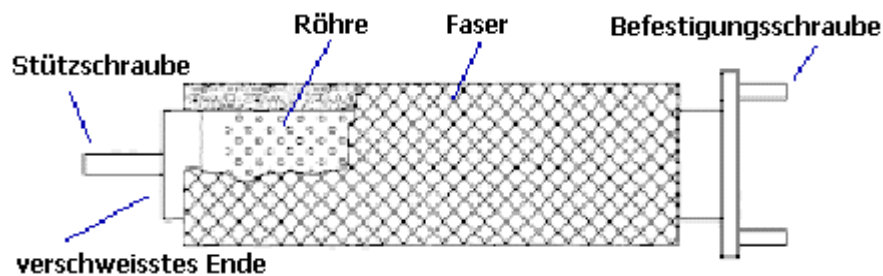


Abbildung 5.2.1.3: Darstellung eines keramischen Faserfilters

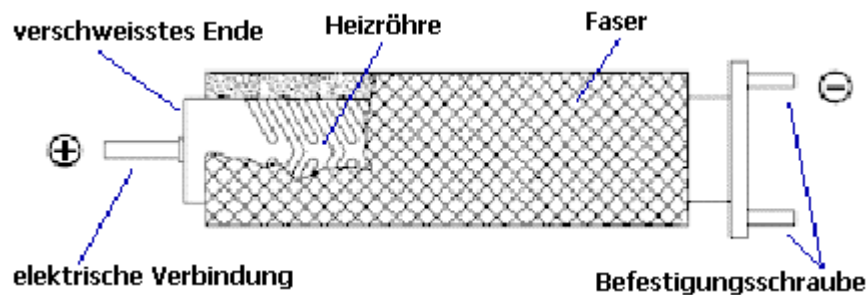


Abbildung 5.2.1.4: Abbildung des gleichen Keramik-Faser-Filters, aber mit elektrischer Beheizung

Keramische Faser-Filter:

Die Keramikfasern wurden in den 80ziger Jahren für den Einsatz in Stadtbussen entwickelt. Ein typischer Aufbau ist in Abbildung 5.1.2.3 dargestellt, in Abbildung 5.1.2.4 mit integrierter Beheizung. Die Firma 3M (Neuss) Deutschland bietet spezielle Partikel-Filter-Kartuschen an.

Sowohl die gewickelten Faserfilter als auch die gestrickten arbeiten als reine Tiefenfilter. Sie neigen weniger zum Verstopfen als der monolithische Keramikfilter und sind sehr thermostabil. Folgende Nachteile werden angegeben:

- geringere Filtrationsleistung
- das Durchlässigkeitsproblem, hervorgerufen durch die Ascheablagerung
- das Abblasen bereits abgeschiedener Partikel
- mögliche Probleme durch Faserfragmente die vom Filter emittiert werden, da die Keramikfasern von der Größe her mit Asbestfasern vergleichbar sind.

5.2.2 Partikelfilter – aktives System

Als aktives System findet das **CRT-System** immer mehr Anwendung im Bus-Bereich. Es kann bei Lkws auch im innerstädtischen Bereich eingesetzt werden, für den Überlandverkehr sind die Laufleistungen des CRT-Systems mit ca. 80000 km zu gering um wirtschaftlich eingesetzt zu werden.

CRT-System (Continuous Regenerating Trap)

Dieses System benutzt die Eigenschaft eines Edelmetall-beschichteten Oxidationskatalysators, im motorischen Abgas vermehrt Stickstoffdioxid (NO_2) aus Stickstoffmonoxid (NO) zu erzeugen. Im nachgeschalteten Rußfilter erfolgt der umgekehrte Vorgang, und das freigewordene Sauerstoff-Atom verbrennt den Kohlenstoff bereits bei sehr tiefen Abgastemperaturen. Es setzt jedoch die Anwendung von weitgehend schwefelfreiem Kraftstoff ($< 50 \text{ ppm}$, besser 10 ppm) voraus, da sonst inakzeptabel hohe Sulfat-Emissionen entstehen und der Katalysator nachhaltig geschädigt wird.

Das System besteht aus zwei Komponenten in einem Gehäuse. Die erste Komponente ist ein oxidativer Katalysator und die zweite Komponente ein keramischer Filter. Der Katalysator besteht aus Platin/Aluminium aufgedampft auf Keramik. Der Filter besteht aus einer nicht katalytischen synthetisch hergestellten, keramischen Kordierit-Wandstrom-Wabenstruktur.

Wesentlich für die Funktion ist das Verhältnis von Ruß zu NO_2 . Bei modernen Motoren im Busbetrieb liegen gute Ergebnisse vor. Das System hat sich auch im Eignungstest an einem Baumaschinenmotor auf dem Prüfstand bewährt. Bei sehr stark Ruß emittierenden Motoren (Dabei handelt es sich um Motoren mit einem erhöhten Ölverbrauch, der sich mit zunehmender Laufleistung einstellt.) kann bei hohen Abgastemperaturen möglicherweise die erforderliche NO_2 -Menge nicht zur Verfügung gestellt werden.

Das CRT-System wurde bisher in Schweden und anderen europäischen Ländern getestet, in denen Dieselmotoren mit einem Gehalt von 10 ppm und niedriger zur Verfügung steht.

[Hawker P, 1997].

SO_2 blockiert die aktiven Zentren des Katalysators und verhindert die Umwandlung von NO zu NO_2 . Dadurch wird im Filter verstärkt Ruß abgeschieden, was zu einer Verstopfung der Filtereinheit führt.

Ein weiterer Grund für die Verwendung von schwefelarmem Kraftstoff ist die Bildung von SO_3 aus SO_2 , welche zu einer verstärkten Sulfatbildung und einer starken Erhöhung sekundärer Partikelemissionen führt. Um die Umformung von NO in NO_2 zu maximieren werden im CRT-System stark oxidativ wirkende Katalysatoren eingesetzt. Die Bildung ist temperaturabhängig. Die minimale Abgastemperatur beträgt 250°C , bei 400°C und höher verdoppelt sich der Ausstoß der Gesamtpartikelmasse bedingt durch den vermehrten Ausstoß an Sulfaten. Das CRT-System arbeitet ab einem Massen pro Volumen Verhältnis NO_x zu Ruß von größer als 25 effektiv.

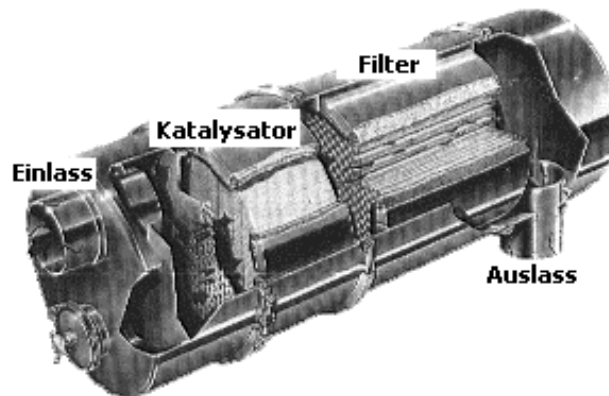


Abbildung 5.2.2.1: Darstellung eines CRT-Systems (mit Bypass im Falle der Filterverstopfung) für Busse

In der Regel ersetzt das System den Schalldämpfer eines Kraftwagens. Die Größe ist ähnlich, nur das Gewicht ist höher. Eine weitere Variante ist die Ersetzung des Auspuffes durch ein CRT-System.

Testergebnisse von schweren Nutzfahrzeugen (Stadtbusse) der EURO I und EURO II Norm (ausgestattet mit einem Pumpe-Leitung-Düse-System) haben ergeben, dass CO und HC-Emissionen, getestet im Europa 13-mode R 49 Testzyklus zu 90-95 % reduziert werden. Aldehydemissionen, Form- und Acetaldehyd eingeschlossen, konnten zu 50 - 90% reduziert werden. Eine Reduktion des Gesamt-NO_x-Ausstoß erfolgte geringfügig.

Effektivität der Partikelminderung

Die Gesamtpartikelmasse wird um 90 % reduziert bei Verwendung von Dieselmotorkraftstoff mit 10 ppm Schwefel. Durch diese Reduktion ist es möglich, dass ein EURO I-Motor ausgerüstet mit einem CRT-System, die EURO III Grenzwerte erfüllt.

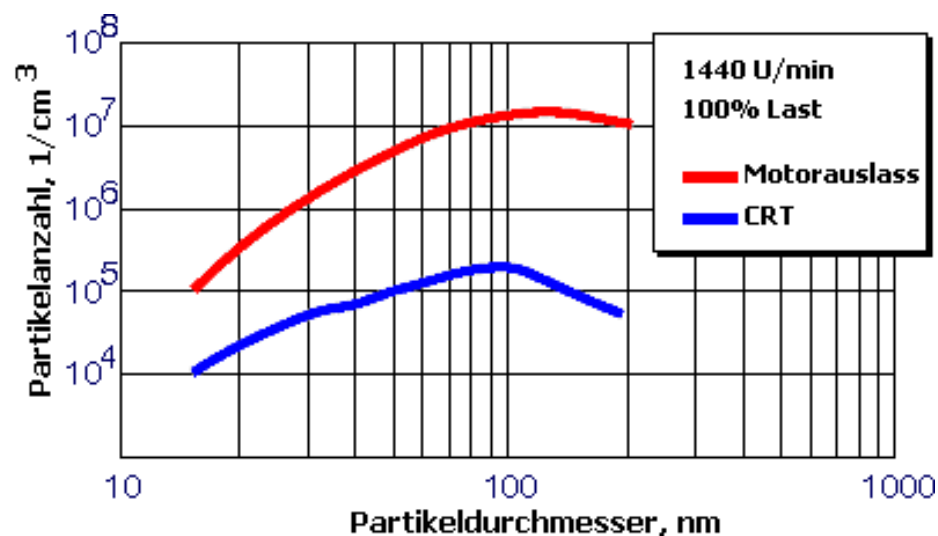


Abbildung 5.2.2.2: Partikelgrößenverteilung mit einem CRT-System

Hawker berichtete 1998, dass auch die Emission der sehr kleinen Partikel ($< 50 \text{ nm}$, Nanopartikel) mit dem CRT-System reduziert wird. Die Daten stammen von einem 6-Zylinder Direkteinspritzer-EURO II-Motor mit Turbolader, Ladeluftkühlung und 167 kW Leistung.

Diese Wirksamkeit des CRT-Systems in Abhängigkeit von der Partikelgröße ist in der Abbildung 5.2.2.2 dargestellt. Nach diesen Messungen beträgt die Minderungsrate selbst bei den kleinsten Partikeldurchmessern von 12 nm bereits 90 %; bei größeren Durchmessern werden Minderungsraten in der Größenordnung von 99 % erreicht. [Hawker P., 1998].

Dem CRT-System wird nachgesagt, dass es zu einer Erhöhung der Zahl der Nanopartikel bedingt durch eine Kernbildung durch Kohlenwasserstoffe hinter dem Filter kommt. Es kann jedoch angenommen werden, dass kaum Kohlenwasserstoffe im CRT-System für eine Kernbildung vorhanden sind, da das System eine hohe Effektivität bei der Reduzierung von Kohlenwasserstoffen und der OC-Fraktion aufweist. Daher muss auf die dauerhafte Leistung des Filters größter Wert gelegt werden. Eine mögliche Gefahr stellt die Bildung von Dioxinen und Furanen bei Temperaturen um 400°C in Anwesenheit von Chlor, Kohlenwasserstoffen und Ruß.

Ergebnisse von Feldversuchen

Bis heute wurden weltweit etwa 6000 Fahrzeuge mit dem CRT-System ausgerüstet, davon 1500 Fahrzeuge in Deutschland, überwiegend Busse. [Hawker P. et al., 1998].

Fast alle Fahrzeuge fuhrten mit Dieselmotoren (Schweden Klasse 1, 10 ppm Schwefel), einige verwendeten Kraftstoff mit 50 ppm Schwefel, einige wenige Tests wurden auch mit schwefelfreiem Biodiesel durchgeführt. Die gesammelten Erfahrungen zeigen, dass für einen angemessenen Betrieb des Systems die Abgastemperatur am Katalysatoreingang zwischen 200 und 400°C betragen sollte. Die Testergebnisse haben weiterhin ergeben, dass der Abgasgegendruck auf Grund von Ascheablagerungen langsam zunimmt. Daher sollte der Filter in periodischen Abständen rückgespült werden, um den Filter von Ascherückständen zu befreien. Dies erfolgt im Rahmen einer Wartung stationär, sofern die CRT-Einheit anstelle des Auspuffs angebracht ist.

5.2.3 Filtersysteme mit Regenerierung durch Additiv-Verbrennung

Das Filtersystem ist kombiniert mit einem vorgeschalteten Oxidationskatalysator, die Regenerierung erfolgt über einen Abbrand bei ca. 250°C . Die Abbrenntemperatur wird durch Metalladditive herabgesetzt.

Zahlreiche Substanzen haben die Eigenschaft, die Rußzündtemperatur bis in den Bereich um und unter 400°C abzusenken. Beispiele sind Cer, Eisen und Kupfer. Für diese - meist als passive Regeneration bezeichnete - Methode liegen positive Ergebnisse vor - vor allem in den Bereichen Bus und Gabelstapler sowie Lkw im innerstädtischen Einsatz. Auch bei Baumaschinen wurden im Rahmen von VERT gute Erfahrungen gesammelt. Voraussetzung ist eine automatisierte "On-board-Dosierung" der Additiv-Substanz. Grundsätzlicher Nachteil ist die Tatsache, dass die Additiv-Substanzen in oxydischer Form im Filter gespeichert werden und dadurch seinen Gegendruck anheben. Voraussetzung zur Verwendung von Kraftstoff-Additiven, die außerordentlich kleine Oxidpartikel (um 20 nm) im Abgasstrom bilden, sind Filter-Systeme, die auch für diese Partikelgrößen ausreichende Abscheidegrade aufweisen, was nicht automatisch dann vorausgesetzt werden kann, wenn die Filter für die eigentlichen Rußpartikel gute Abscheideraten haben. Grundsätzlich kann man nicht ausschließen, dass die gespeicherten Regenerations-Additive auch nachteilige katalytische Wirkungen entwickeln, in deren Folge Sekundäremissionen entstehen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auf die Bildung

von Sulfaten sowie auf die Bildung von Dioxinen und Furanen hinzuweisen [EMPA, 1999]. Dies muss in jedem Einzelfall für den jeweiligen auf dem Markt angebotenen Filter überprüft werden.

Durch Zugabe von Additiven kann die Abbrenntemperatur der Partikel von 650 °C auf 350 °C gesenkt werden. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Metallkohlenwasserstoffe (auf Eisen oder Cer-Basis), die über den Kraftstoff oder die Ansaugluft der Verbrennung zugeführt werden. Während der Verbrennung erfolgt die Oxidation der Metallkohlenwasserstoffe und diese entstandenen Metalloxide gehen mit den einzelnen Partikel eine sehr enge Verbindung ein. Diese angelagerten Metalloxide setzen nun die Abbrenntemperatur der Partikel herab, wodurch sich das Filter bereits bei sehr niedrigen Belastungen des Motors ohne zusätzliche Einrichtungen freibrennen kann. Durch die niedrigere Abbrenntemperatur und die häufigeren Abbrennvorgänge werden die gefährlichen Temperaturspitzen im Filter vermieden.

[TÜV Bayern, 1994]

Zusätzlich verringern diese Additive bereits im Verbrennungs-Vorgang die Entstehung von Partikeln um ca. 10-15 %, jedoch erhöht sich die Bildung der Feinstpartikel (20 - 50 nm) um bis zu zwei Größenordnungen. Daher darf eine Additivierung des Dieseldkraftstoffes nur bei gleichzeitiger Verwendung eines geeigneten Filtersystems erfolgen.

[UBA, 1998]

6. Ergebnisse von Emissionsmessungen

Im Verlauf der Recherche (Untersuchung) zeigte sich, dass vor allem Messungen von Partikeln nur spärlich vorliegen oder veröffentlicht sind. Nur wenige Ergebnisse berücksichtigen Partikelanzahl und Größenverteilung.

6.1. Partikelanzahl und Partikelmenge an Pkws ohne Filtereinheit

Es wurden sieben Fahrzeuge auf den Ausstoß an Partikelanzahl und Partikelmenge hin untersucht. Bei den Fahrzeugen handelte es sich um vier Diesel- und drei Ottomotorfahrzeuge. Wobei nachstehend die technischen Informationen über die Testfahrzeuge aufgeführt sind.[Concawe, 1998]

Fahrzeug	Injektionssystem	Katalysator	Hub- raum [Liter]	Leistung [KW]
V1 Diesel	IDI	Oxidationskatalysator	1,9	55
V2 Diesel	DI	Oxidationskatalysator / Turbolader	1,9	66
V3 Diesel	DI		2,5	52
V4 Diesel	DI	Oxidationskatalysator / Turbolader	1,9	66
V5 Ottomotor	MPI	(alte Technologie) ohne Katalysator	1,8	82
V6 Ottomotor	SPI	Drei-Wege-Katalysator	1	34
V7 Ottomotor	MPI	Drei-Wege-Katalysator	2	136

IDI: Indirekte Einspritzung (Wirbelkammer und Vorkammereinspritzung) DI: Direkte Einspritzung

Anmerkung: Das Einspritzsystem von V5 ohne Katalysator war technisch besser entwickelt als das von V6 mit Drei-Wege-Katalysator

Tabelle 6.1 : Technische Informationen über die Testfahrzeuge

6.1.1 Vergleich der Diesel-Pkw

In der Abbildung 6.1.1 sind die unterschiedlichen Partikelmasse-Emissionen, aufgeteilt nach zwei Fraktionen bezüglich der Partikelgröße, dargestellt.

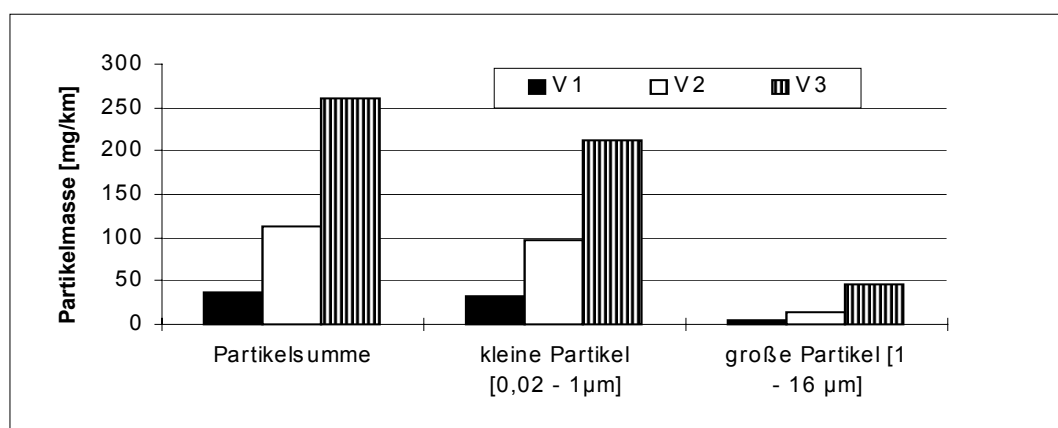


Abbildung 6.1.1: Vergleich dreier Diesel-Pkws in Bezug auf die Partikelmassebildung

V1 ist mit einem 1,9 L-Motor, Indirektem Einspritzsystem und Oxidationskatalysator ausgerüstet. Bei V2 handelt es sich um einen Wagen mit 1,9 L Motor, Direktem Einspritzsystem, Oxidationskatalysator und Turbolader, V3 ist mit einer 2,5 L Maschine und einem Direkten Einspritzsystem ausgestattet, jedoch ohne Oxidationskatalysator. Was die Emission an **Partikelmasse** anbelangt, so erweist sich das Indirekte Einspritzsystem mit Oxidationskatalysator (V1) als das Wirksamste. Die Partikelmasse liegt um das Fünf-fache niedriger als beim Typ V3. Die Fahrzeuge sind jedoch auf Grund von Motoren mit unterschiedlichem Hubraum nur bedingt vergleichbar.

6.1.2. Vergleich von Dieseldieselfahrzeugen in Bezug auf die Partikelbildung

Getestet wurden drei verschiedene Kraftstoffsorten mit allen Motoren. Aus diesen Messergebnissen wurden Mittelwerte über die verschiedenen Motoren gebildet. Aus Abbildung 6.1.2 geht hervor, dass die unterschiedlichen Kraftstoffe vor allem einen Einfluss auf die Emission an kleinen Partikel haben.

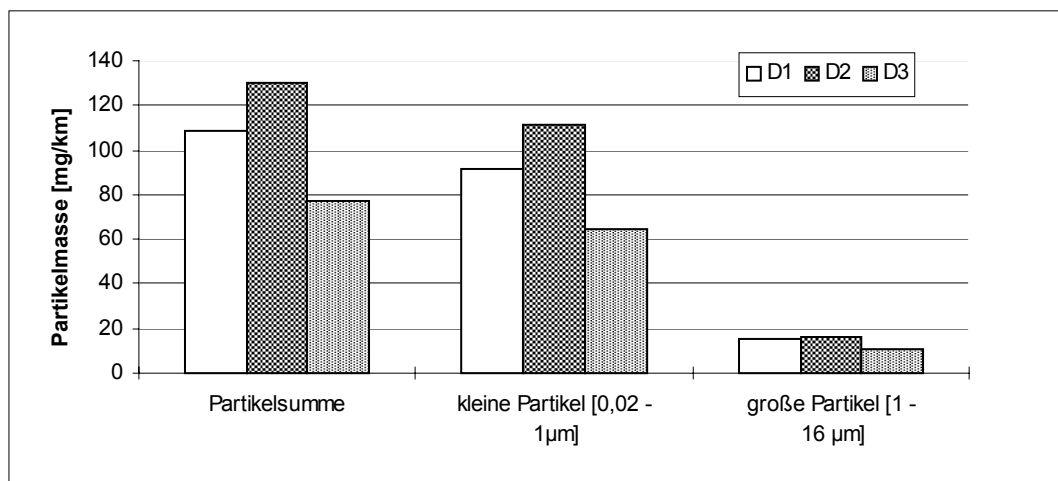


Abbildung 6.1.2: Vergleich dreier Kraftstoffe auf die Bildung von Partikel

Die Kraftstoffe unterscheiden sich hauptsächlich im Schwefelgehalt, dem Aromatenanteil und der Cetanzahl.

D1: mittlere	Cetanzahl	Schwefel:	367 mg/kg	Aromaten:	33,8	%Massenanteil
D2: niedrigste	Cetanzahl	Schwefel:	394 mg/kg	Aromaten:	27,5	%Massenanteil
D3: höchste	Cetanzahl	Schwefel:	< 1 mg/kg	Aromaten:	5,4	%Massenanteil

Insgesamt hat der Dieseldieselfahrzeugstoff D3 das geringste Partikelbildungspotential. Am besten schneidet er bei der Fraktion der kleinen Partikel (0,02-1 µm) ab.

6.1.3 Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Diesel-Pkw und der Ottomotor-Pkw bei konstant 50 und 120 km/h (Fahrzeuge nach Tabelle 6.1)

Das Maximum der Partikelgröße liegt für die Diesel-Pkw bei beiden Geschwindigkeiten im Mittel um 100 nm. Dies ist aus der Abbildung 6.1.3 a und b ersichtlich.

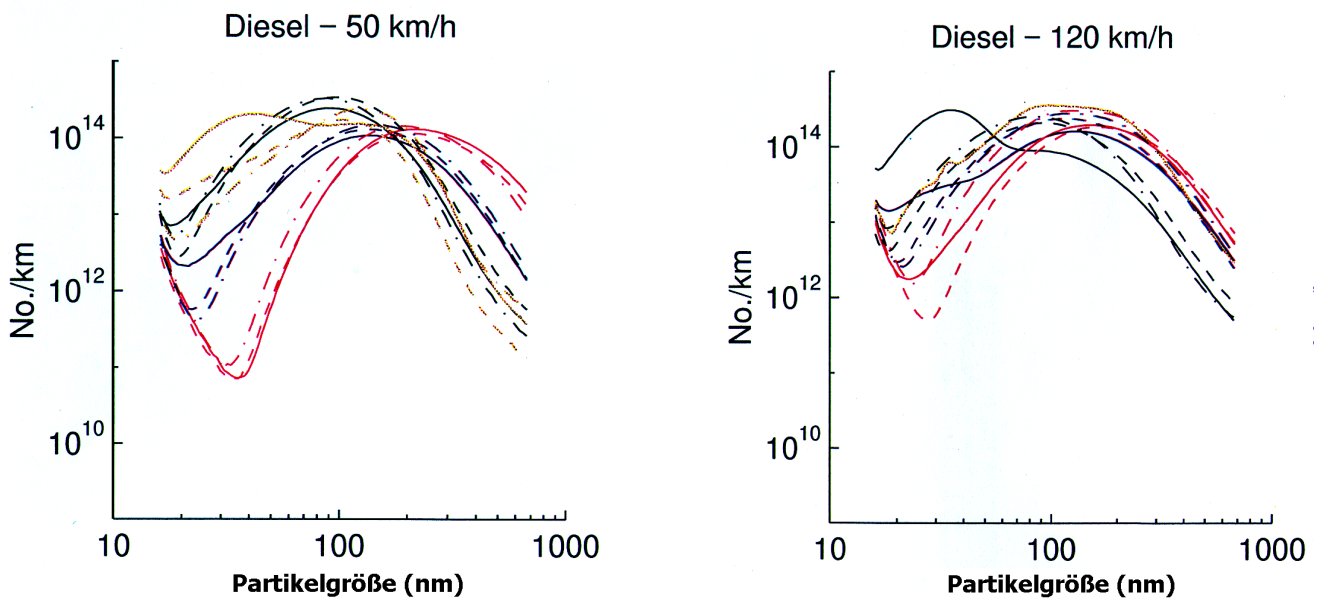


Abbildung 6.1.3 a und b: Partikelgrößenverteilung beim Diesel-Pkw bei einer Geschwindigkeit von konstant 50 und konstant 120 km/h

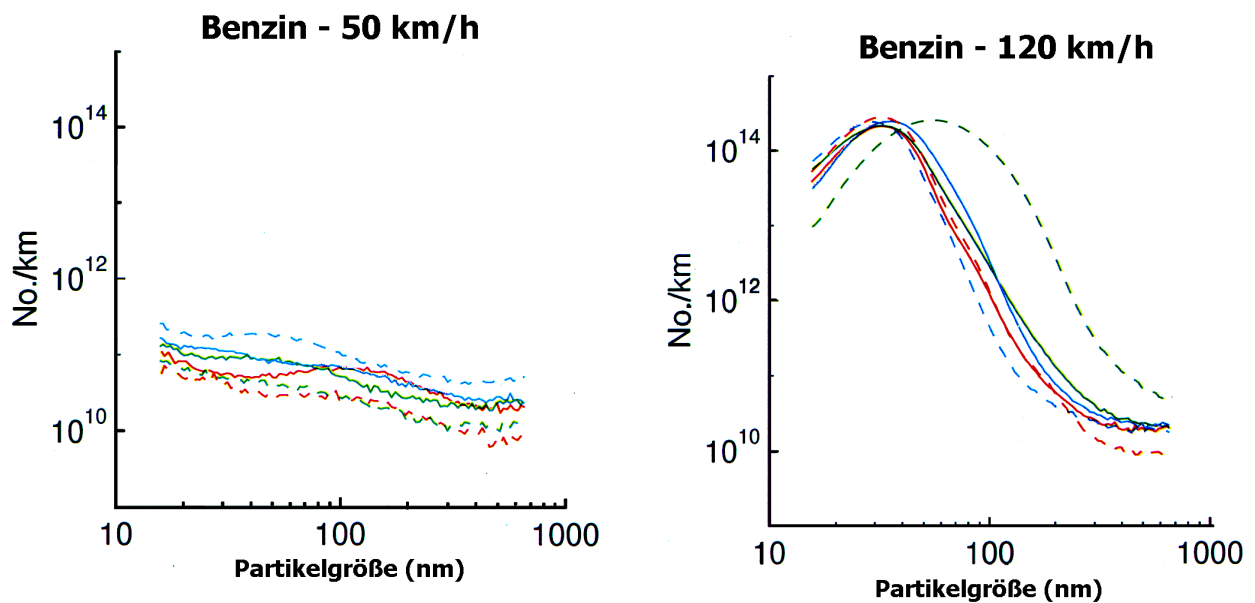


Abbildung 6.1.4 a und b: Partikelgrößenverteilung beim Benzin-Pkw bei einer Geschwindigkeit von konstant 50 und konstant 120 km/h

Beim Vergleich der Partikelgrößenverteilung zwischen Diesel- und Ottomotor (siehe Abbildung 6.1.3. b und 6.1.4 b) fällt auf, dass das Maximum beim Ottomotor bei 20-30 nm liegt, beim Diesel bei 100 nm. Die Partikel des Ottomotors sind nur etwa halb so groß wie die des Diesels und zahlenmäßig in der Summe zwischen einer und drei Zehnerpotenzen geringer.

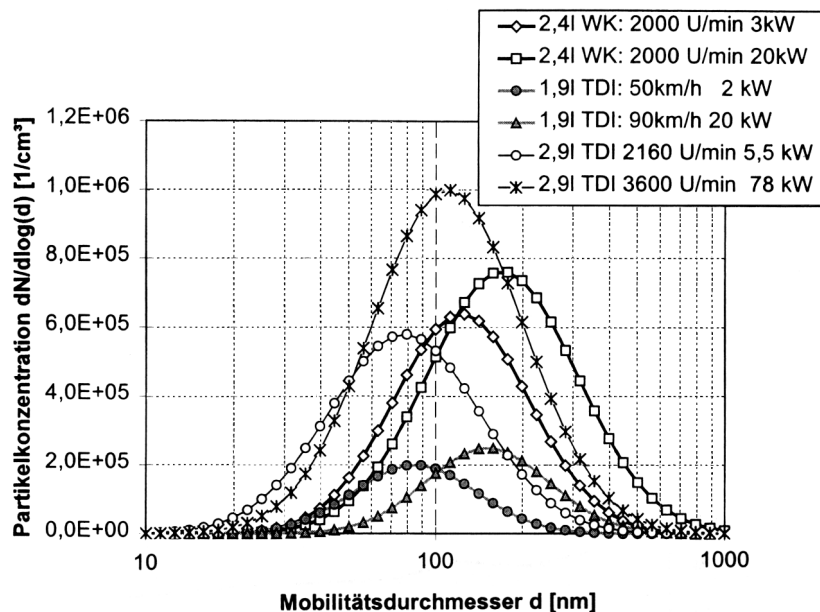


Abbildung 6.1.5: Darstellung der Partikelgrößenverteilung aus dem Abgas von drei verschiedenen Dieselmotoren

WK= Wirbelkammer

TDI= Direkteinspritzer

Die Abbildung 6.1.5 zeigt Partikelgrößenverteilungen aus dem Abgas von drei verschiedenen Dieselmotoren, die mit Hilfe des SMPS (= Scanning Mobility Particle Sizer) ermittelt wurden. Obwohl es sich um sehr unterschiedliche Motoren handelt, liegen die maximalen Konzentrationen der Kurven in einem ähnlichen Bereich zwischen ca. 60 und 200 nm. Die Darstellung der Partikelkonzentration lässt jedoch nur qualitative Aussagen über die Partikelgrößenverteilung zu. Ein direkter Vergleich der Motoren ist damit nicht möglich, da die emittierte Partikelanzahl nicht nur von der Konzentration sondern auch vom Abgasvolumenstrom abhängt.

Jedoch zeigt die Graphik deutlich, dass Dieselmotoren mit Direkteinspritzung (TDI) keine kleineren Partikel freisetzen, als Dieselmotoren mit indirektem Einspritzverfahren (Wirbelkammerverfahren).

6.1.4 Vergleich von Otto- und Dieselmotorfahrzeuge hinsichtlich ihrer Emission an Partikel

Der Vergleich der Ottomotor- betriebenen und Dieselmotor betriebenen Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Partikelemission zeigt, dass die Ottomotoren zwar ebenfalls Partikel emittieren, die Emission bei konstant 50 km/h allerdings um 4 Zehnerpotenzen niedriger liegt. Bei konstant 120 km/h relativiert sich der Vorteil des Ottomotors jedoch. Der Ausstoß an Partikel liegt aber noch um fast eine Zehnerpotenz niedriger als beim Diesel. Im ECE+EUDC heißen Zyklus hängt die Emissionsverringerung vom Fahrzeugtyp ab. Sie liegt zwischen einer und drei Zehnerpotenzen.

Dies ist in Abbildung 6.1.5 dargestellt [Concawe, 1998].

Es besteht daher dringender Forschungsbedarf zum gesamten Komplex der Partikelemission, dem ACEA (Europäische Vereinigung der Automobilhersteller) durch einen für Anfang 2000 zu erwartenden Bericht Rechnung tragen möchte. Es wurden 11 Diesel-Pkw und 5 Pkw mit Ottomotor hinsichtlich Partikelmasse und Partikelanzahl bei Konstant 50 und 120 km/h sowie im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) von zwei unabhängigen Messinstituten untersucht.

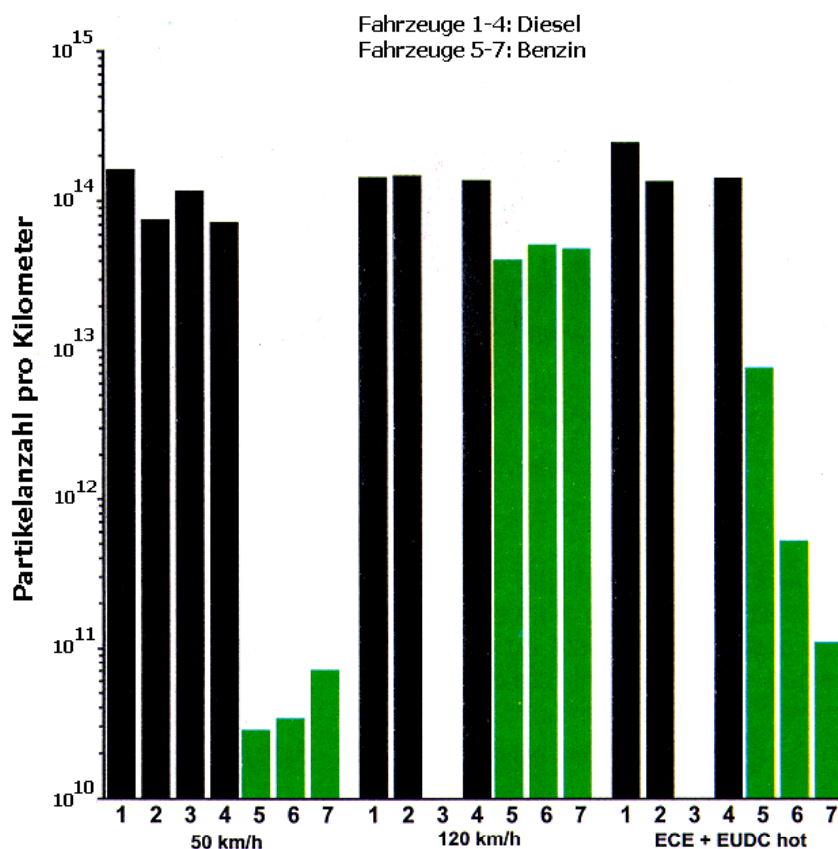


Abbildung 6.1.5: Vergleich der Partikel-Emissionen bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Testzyklen

6.2. Ergebnisse von Messungen der Partikelanzahl bei leichten Nutzfahrzeugen und Pkws mit Ottomotor (Fa. FORD)

Bei Ford in Amerika wurden leichte Nutzfahrzeuge und Pkw, alles Ottomotorfahrzeuge, auf ihre zahlenmäßige Emission an Partikel hin untersucht. In Abbildung 6.2.1 sind die Partikelanzahlen der einzelnen Fahrzeuge bei unterschiedlichen US-Fahrzyklen dargestellt. Dabei fällt das Nutzfahrzeug T2 aus dem Rahmen. Im gleichmäßigen Fahrmodus wurden die höchsten Partikelanzahlen gemessen. Im Vergleich zu den Ergebnissen des Concawe-Berichtes für Otto Motoren (siehe Abbildung 6.1.) liegt die Partikelemission in der gleichen Größenordnung. Die Fahrzyklen sind allerdings nicht direkt miteinander vergleichbar.

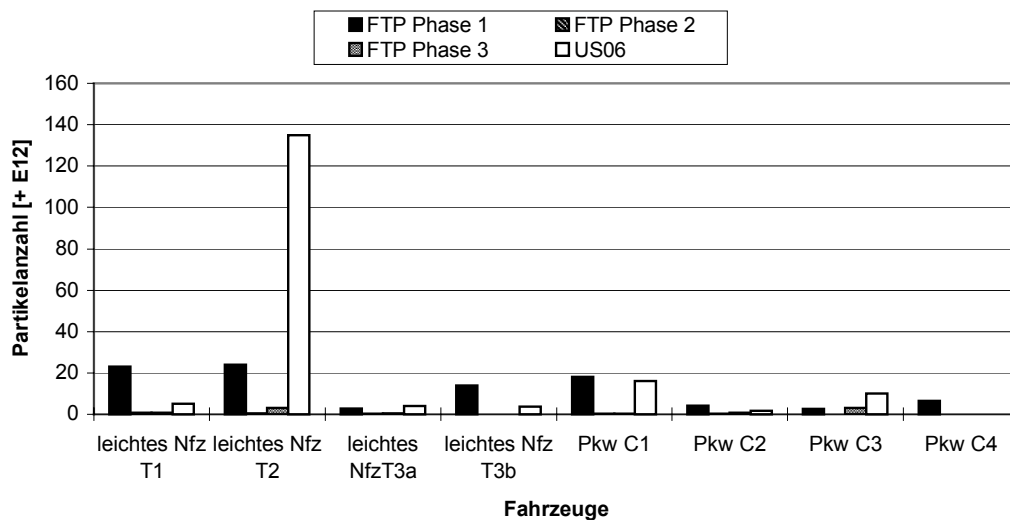


Abbildung 6.2.1: Emission der Partikelanzahl bei leichten Nutzfahrzeugen und Pkw mit Otto Motor der Fa. FORD getestet im FTP- und US06-Zyklus

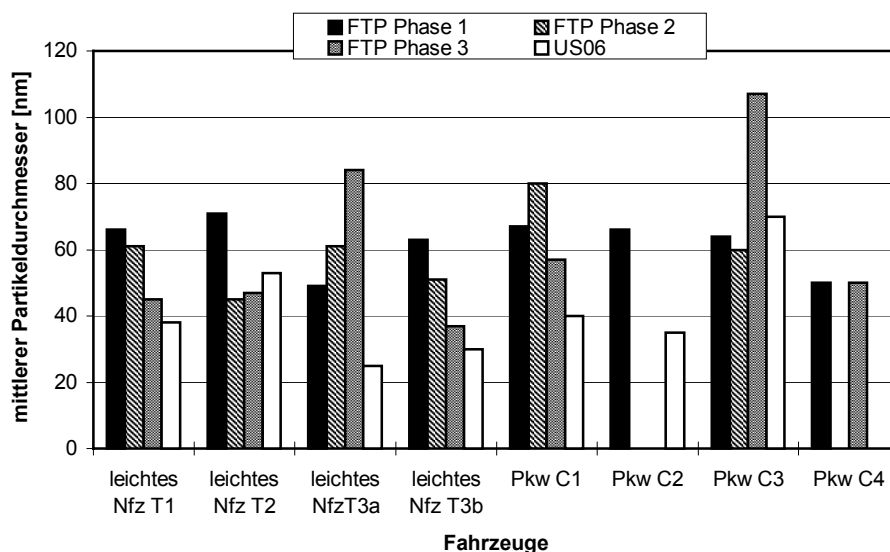


Abbildung 6.2.2: Darstellung des mittleren Partikeldurchmessers leichter Nutzfahrzeuge und Pkw mit Otto Motor der Fa. FORD getestet im FTP- und US06-Zyklus

Der mittlere Partikeldurchmesser variierte je nach Fahrzyklus bei den Pkws zwischen 30-40 nm bei konstanter Fahrt (US06) und lag im FTP-Zyklus bei 50-80 nm (siehe Abbildung 6.2.2). Dies könnte bedeuten, dass der Ottomotor bei einem Fahrverhalten, das durch Beschleunigungs- und Abbremsphasen gekennzeichnet ist, etwas größere Partikel emittiert. Zur Zusammensetzung wurden keine Angaben gemacht.

6.3 Messungen an Diesel - Bussen

Bei der Firma MAN wurden Linienbusse mit Dieselmotor, Dieselmotor mit Oxidationskatalysator, Dieselmotor mit CRT-System und mit zusätzlicher NO_x-Minderung (SCRT-System) sowie Linienbusse mit Erdgasantrieb, einmal mit CNG (Lambda 1) und 3-Wege-Katalysator und CNG (mager) mit Oxidationskatalysator dem ECE R49-13-Stufen-Test unterzogen.

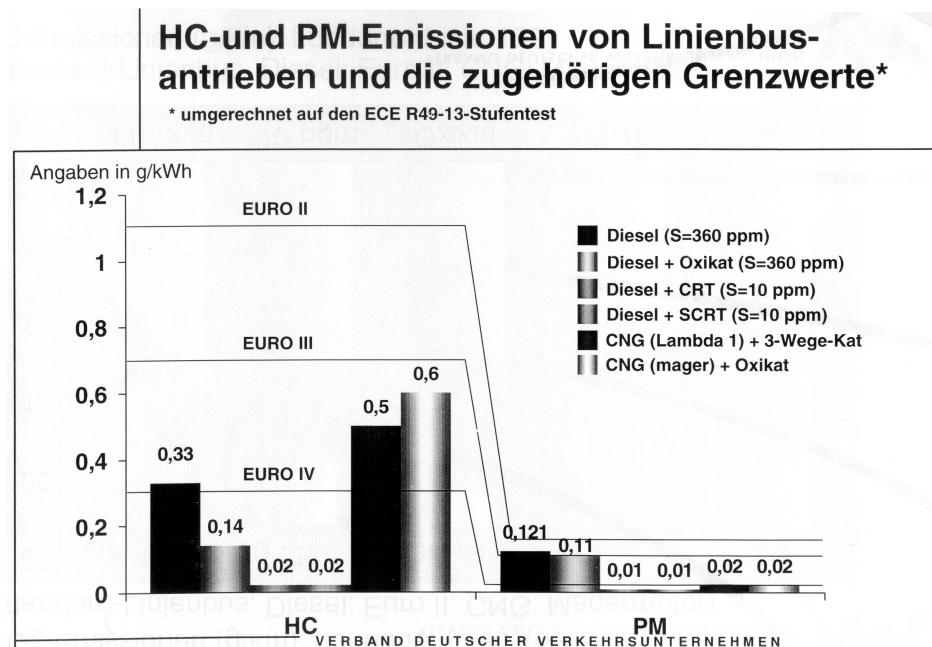


Abbildung 6.3.1: Gasförmige Kohlenwasserstoff- und Partikel-Emissionen von Linienbusantrieben und die zugehörigen Grenzwerte

In Abbildung 6.3.1 sind die Werte für HC (gasförmige Kohlenwasserstoffemissionen) und für die Partikelmasse den Grenzwerten der EURO-Normen I-IV gegenübergestellt. Die beiden Dieselmotoren, - ausgerüstet mit einem CRT-Filtersystem mit integriertem Oxidationskatalysator bzw. dem gleichen Filtersystem mit nachgeschalteter NO_x-Minderungsstufe bei Verwendung von schwefelarmem Dieselmotorkraftstoff -, erfüllen beide hinsichtlich HC- und Partikel-Emissionen die EURO IV-Norm. Es wurden keine Angaben über Partikelgrößenverteilung und Partikelanzahl gemacht. Es zeigt sich, dass nur durch die Verwendung des Oxidationskatalysators mit dem Partikelfilter beim Bus EURO IV erreicht werden kann. Die Erdgasbusse erreichten auch mit einem 3-Wege-Katalysator, bzw. Oxidationskatalysator nicht den geforderten Grenzwert für gasförmige Kohlenwasserstoffe HC der EURO IV-Norm. Das SCRT-System ist derzeit serienmäßig noch nicht erhältlich.

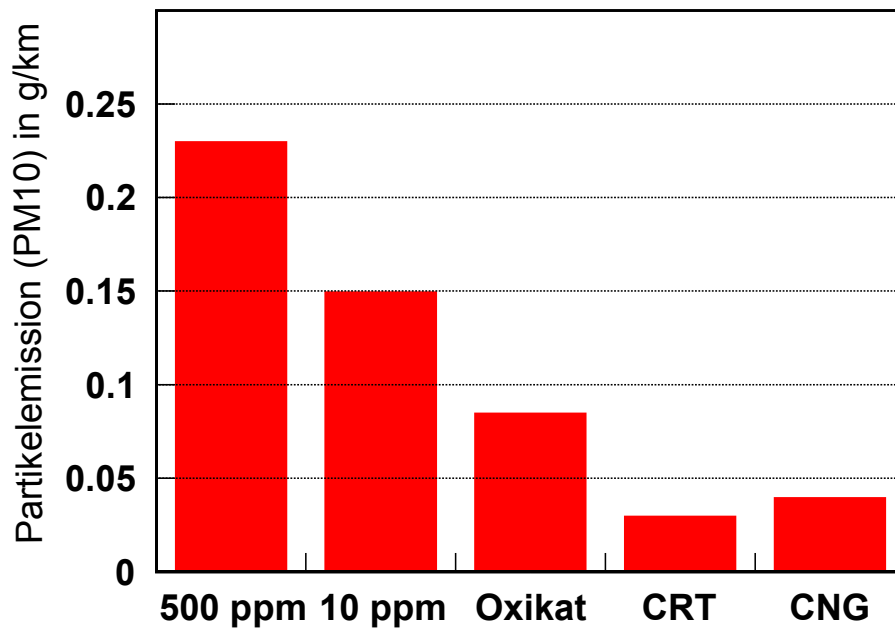


Abbildung 6.3.2: Partikelemissionen (PM 10) eines Linienbusses der Londoner Linie 159

In der Abb.6.3.2 sind die Partikel - Emissionen (PM 10) - eines Linienbusses EURO II bei Verwendung von 500 ppm Schwefel bzw. 10 ppm im Dieselmotorkraftstoff sowie unter Verwendung eines Oxidationskatalysators bzw. CRT-Filter Systems gegenüber einem Erdgas-Motormotor im Praxisbetrieb auf der Bus Linie 159 in London aufgeführt.

Hier schneidet ebenfalls der Dieselmotor mit CRT-System am Besten ab. Die Messwerte sind mit der EURO IV-Norm nicht direkt vergleichbar, da sie in g/km gemessen wurden, die Norm dagegen g/kWh vorgibt.

6.4. Partikelemissionen von LKW

An einem Lkw der Firma MAN wurde ein CRT-Partikelfilter-System getestet.

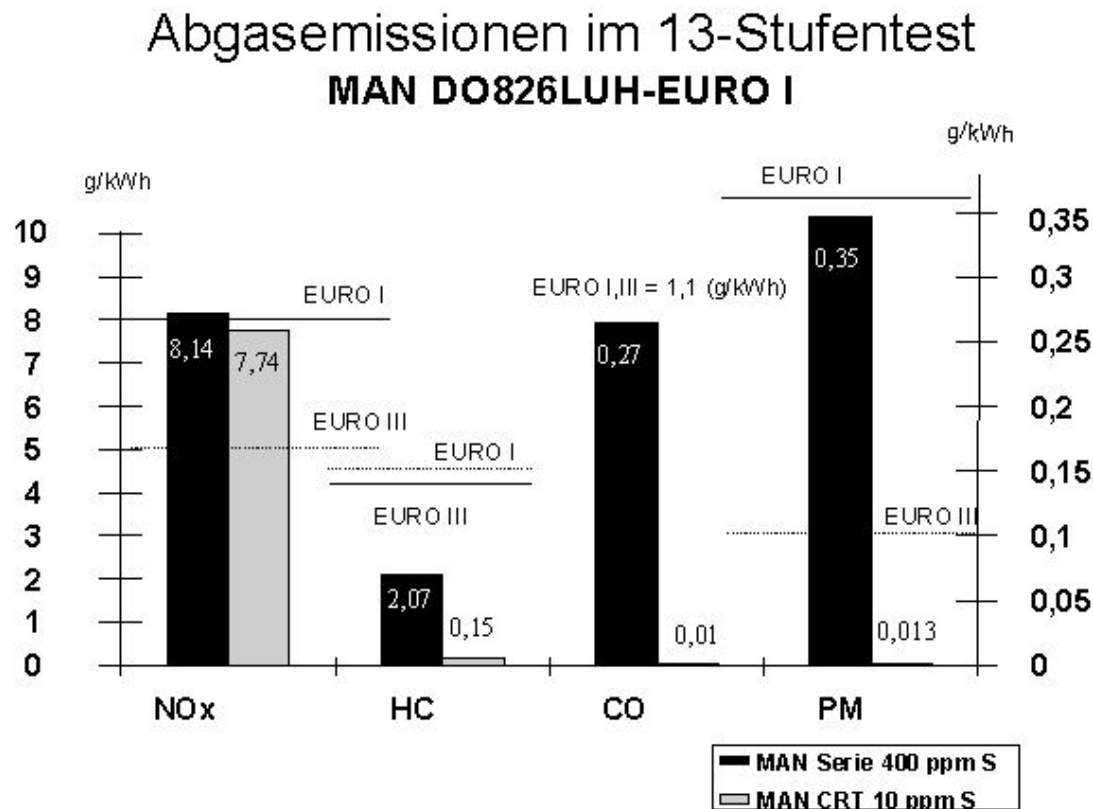


Abbildung 6.4.1: Abgasemissionen im 13-Stufentest bei einem Lkw der Firma MAN

Die Ergebnisse aus Abbildung 6.4.1 zeigen, dass mit einem konventionellen Dieseldieselfahrzeug mit 400 ppm bei der Partikelmasse gerade EURO I eingehalten wird. Unter Verwendung des CRT-Filters (der keine Regenerierung mit Additiven benötigt) wird sogar EURO IV erreicht. Eine umfassende Studie bezüglich Partikelmasse- und Partikelanzahlemission von Nutzfahrzeugen wird derzeit von der ACEA (Europäische Vereinigung der Automobilhersteller) durchgeführt. Der Abschlussbericht wird für Mitte 2000 erwartet.

6.5. Einfluß des Kaltstarts auf die Partikelemission beim Dieselfahrzeug

Die in Tabelle 6.5.1 dargestellten Kaltstartzuschläge für Partikel bei Dieselfahrzeugen machen deutlich, welchen Fortschritt die Motortechnik auf dem Gebiet der Ruß- und Partikelemission gemacht hat. Ältere Fahrzeuge emittieren deutlich über 50 mg Partikel je Startvorgang, während die in den Klassen 10 und 11 vermessenen Fahrzeugtypen mit 17 mg bzw. 43 mg Partikel unter diesem Wert liegen. Den Vorteil des Direkteinspritzungsverfahrens gegenüber dem Vorkammervorgang für die Partikelemission bei Dieselmotoren zeigt Klasse 14 mit nur 1 mg Partikelzuschlag pro Warmlauf.

Schadstoffkategorie	Fahrzeug- klasse	Hubraum [L]	Partikel [mg]
Dieselmotor mit höchsten Anforderungen an die Abgasqualität(91/441/EWG; 94/12/EWG)	10	< 2	17
	11	> 2	43
Dieselmotor mit niedrigen Anforderungen an die Abgasqualität(89/491/EWG Anl. XXIII; 89/491/Anl. XXV)	12	< 2	125
	13	> 2	86
Dieselmotor mit Direkteinspritzung	14		1

[Hitzler G. 1997]

Tabelle 6.5.1: Angabe der Kaltstartzuschläge an Partikelemissionen im Rahmen der Typprüfung, getrennt nach Fahrzeugklassen

Bei der Fahrzeugklasse 12 wurde zusätzlich die Partikelemission bei einer Starttemperatur von 0 °C untersucht. Es ergab sich ein Wert von 1500 mg! Diese Konzentration liegt 12 mal höher als bei einer Starttemperatur von 20 °C. Kaltstartzuschlag für Partikelemissionen bei der Umgebungstemperatur von 20 °C.

Schadstoffkategorie	Fahrzeug- klasse	Hubraum [Liter]	Partikel [mg/km]			
			STRAßENTYP			
			1	2	3	4
Dieselmotor mit höchsten Anforderungen an die Abgasqualität (91/441/EWG; 94/12/EWG)	10	< 2	58	59	128	59
	11	> 2	33	42	200	56
Dieselmotor mit niedrigen Anforderungen an die Abgasqualität (89/491/EWG Anl. XXIII; 89/491/Anl. XXV)	12	< 2	87	88	253	109
	13	> 2	155	135	191	132
Dieselmotor mit Direkteinspritzung	14		43	44	100	56

1=Höchstgeschwindigkeit 80 km/h, Steigung unter 2%,

2=Höchstgeschwindigkeit 50 km/h, Steigung unter 2%

3= Höchstgeschwindigkeit 50 km/h, Steigung im Mittel 5% im Maximum 9,5 %,

4=Höchstgeschwindigkeit 30 km/h Steigung unter 2%

Tabelle 6.5.2: Partikel-Emissionsfaktoren für Straßentyp 1 bis 4 [Hitzler G. 1998]

Das Fahrverhalten bei den unterschiedlichen Straßentypen hat über alle Fahrzeugklassen hinweg bei Straßentyp 3 den größten Einfluss auf die Partikelemission.

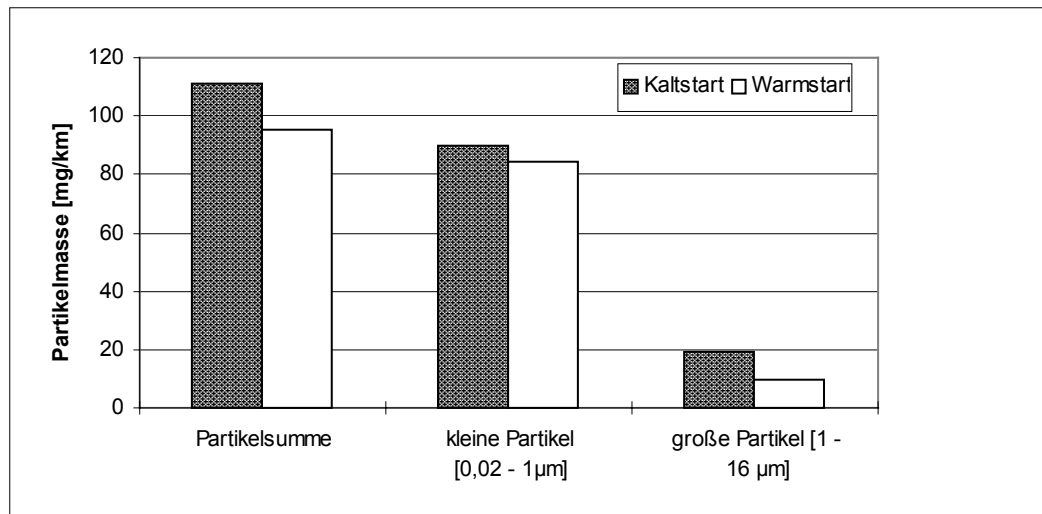


Abbildung 6.5.2.1: Vergleich Kalt- und Warmstart in Bezug auf die Partikelmasse

Obige Abbildung beschreibt den Einfluss des Kaltstarts auf die Partikelbildung. Sowohl die Masse an kleinen wie an großen Partikel ist beim Kaltstart erhöht. Jedoch ist der Ausstoß an großen Partikel doppelt so hoch wie beim Warmstart. Die Menge an kleinen Partikel nimmt dagegen nur um etwa 10 % zu.

7. Ausblick

Peugeot wird ab dem Jahr 2000 das Modell 607 mit einem 2,2 L Dieselmotor mit Common-Rail-Technik auf den Markt bringen. Das verwendete FAP-Filtersystem basiert auf einem porösen Silikon Carbide Substrat. Ein Oxidationskatalysator ist vorgeschaltet. Die Regenerierung des Filters erfolgt alle 400-500 km und wird vom Common-Rail-Injektionssystem gesteuert. Mehrfacheinspritzungen während des Regenerierungszeitraumes erhöhen die Verbrennungstemperatur. Der Oxidationskatalysator oxidiert die nichtverbrannten Kohlenwasserstoffe aus den Mehrfacheinspritzungen wobei ebenfalls eine Temperaturerhöhung eintritt. Beide Effekte führen in der Summe zu einer Abgastemperatur von 450 °C. Das Kraftstoffadditiv auf CER-Basis wird zur Erniedrigung der Verbrennungstemperatur von Dieselmotoren benutzt, um den Filter schon bei Temperaturen unter 450 °C regenerieren zu können. Das Additiv wird aus einem Tank im Fahrzeug automatisch nach dem Tanken in den vollen Kraftstofftank zu dosiert. Nach 80000 km Fahrleistung muß der Filter von Additivasche unter Hochdruck mit Wasser gereinigt und das Additiv nachgefüllt werden.

Partikelfilter wurden zwar in den 80er Jahren in Fahrzeugen (Daimler-Benz) aus Deutschland für den amerikanischen Markt eingesetzt, doch auf Grund technischer Probleme schnell wieder aufgegeben, da mit motortechnischen Massnahmen die Grenzwerte eingehalten werden konnten. Peugeot wird den ersten massenproduzierten Pkw, ausgerüstet mit einem modernen Partikelfiltersystem, auf den Markt bringen. Damit wird laut Peugeot der EU- Standard für das Jahr 2005 von 0,025 µg/km eingehalten. Peugeot gab die Entwicklungskosten mit 400 Millionen Francs an.

Bedingt durch den Druck der Umweltbehörden sowohl der EU, als auch der U.S.A. sind die Automobilhersteller zum Handeln gezwungen, um die Emissionen der Partikelmasse zu reduzieren.

Abschließend sind in der Tabelle 7.1 Abschätzungen des UBA aus dem Jahr 1996 aufgelistet, wobei sich ersehen läßt, dass der Zeitplan nicht ganz eingehalten werden konnte.

Technik	Erreichbare Minderung verglichen mit heutigem Standard in %				Kosten in der Serienproduktion in DM	Prognose der Verfügbarkeit 1996	Tatsächliche Verfügbarkeit Ende 1999
	CO	HC	NOx	Partikel			
Zeolith-Katalysator mit Reduktionsmittel			80–90	10-20	250 - 300	2-3 Jahre	Ja
Denox-Katalysator			40		150 - 200	2-3 Jahre	Ja
Weiterentwickelte Abgasrückführung			50-70		70 - 90	verfügbar	Ja
Verbesserter Oxidationskatalysator	10-30	10-30		0-10	20	1 Jahr	Ja
Partikelfilter				50-90	300 - 600	1 - 2 Jahre	Ja
							PKW EINES HERSTELLERS

Tabelle 7.1: Neue Abgasreinigungstechniken für Pkw mit Diesel-Motor (Prognose Stand 1996)

8. Zusammenfassung

Das Auftreten von Partikeln in der Luft ist seit einiger Zeit vermehrt Gegenstand der öffentlichen Diskussion. Einige neuere Studien zeigen eindeutige negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit auf. Charakteristisch für Partikel aus Verbrennungsmotoren ist der relativ hohe Anteil an Kohlenstoff und die fast ausschließliche Emission an sehr kleinen, und damit lungengängigen Teilchen. Nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft ist eher die Größe der Partikel ausschlaggebend für die menschliche Gesundheit und nicht die Herkunft oder Zusammensetzung der Partikel.

Die vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Immissions- und Abgasgrenzwerte sowie die Messverfahren beziehen sich ausschließlich auf die Partikelmasse. Die wünschenswerte Bestimmung der Partikelanzahl ist messtechnisch sehr aufwendig und noch nicht standardisiert.

Aufgrund motortechnischer Gegebenheiten (inhomogenes Kraftstoff-Luft-Gemisch, unvollständige Verdampfung) und dem höheren Anteil an langkettigen, höhersiedenden Kohlenwasserstoffen im Dieselmotorkraftstoff emittiert der Dieselmotor wesentlich mehr Partikelmasse als der Ottomotor. Rußpartikel entstehen bei der nicht vollständigen Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe.

Die Rußpartikel bestehen im Kern aus elementarem Kohlenstoff, der organisch nicht löslich und bis 650 °C stabil ist. Daran angelagert sind Kohlenwasserstoffverbindungen, aber auch anorganische Bestandteile wie z.B. Sulfate oder Metalloxide.

Die Hauptanzahl der Partikel im Dieselmotorausgas weist nach den vorliegenden Messungen einen Durchmesser von 100 nm auf. Interessant ist die Beziehung Partikelmasse zu Partikelanzahl bzw. -oberfläche. Eine Million Partikel mit einem Durchmesser von 100 nm wiegen ebensoviel wie ein Partikel mit einem Durchmesser von 10000 nm. Die gesamte Partikeloberfläche der einen Million Partikel ist 100-fach größer als die Partikeloberfläche des 10000 nm (=10 µm) großen Partikel.

Seitens der Automobilindustrie werden große Anstrengungen unternommen die Partikelbildung allein durch Maßnahmen im Bereich der Motortechnik zu minimieren. Ein wichtiger Teil ist das veränderte Einspritzsystem.

Bei den herkömmlichen indirekten Einspritzverfahren ist die Brennkammer geteilt. Der gezündete Kraftstoff expandiert von der Vor- in die Hauptkammer. Dabei kommt es zu Überströmverlusten und somit zu höherem Kraftstoffverbrauch.

Durch die neuere Direkteinspritzung ergibt sich eine primär gewünschte Kraftstoffeinsparung von etwa 15 %. Das am weitesten verbreitete Verfahren ist das der **Common-Rail-Technik**. Alle Zylinder werden über eine Hochdruckleitung mit einer Hochdruckpumpe verbunden. Es können Drücke von etwa 135 MPa erreicht werden, eine weitere Erhöhung des Einspritzdrucks auf mehr als 200 MPa wäre wünschenswert, da dann die Verbrennung nahezu rauchfrei abläuft.

Ein solcher Druck wird mit dem **Pumpe-Düse-Verfahren** erzielt. Hierbei bilden Pumpe und Düse für jeden Zylinder eine Einheit. Dieses Verfahren ist jedoch konstruktiv aufwendiger und eignet sich nur für Motoren mit bis zu maximal vier Zylindern.

Durch die Einführung der **elektronischen Motorkontrolle** sind herkömmliche Probleme beim Dieselmotor wie Kaltstart, Regelung motortechnischer Parameter und vorübergehende Rauchemissionen weitgehend steuerbar.

Der **Zündzeitpunkt** beeinflusst ebenfalls den Ausstoß an Partikel. Eine verspätete Zündung führt zwar zu verringertem Stickstoffoxid-(NO_x)-Ausstoß, jedoch zu höherem Kraftstoffverbrauch und verstärkter Emission an Kohlenwasserstoffen und Partikel.

Die **Abgasrückführung** ist eine weitere wirkungsvolle Maßnahme um die Stickstoffoxid-(NO_x)-Bildung zu minimieren. Nachteilig ist dagegen die gleichzeitige Erhöhung der Rußbildung und damit der Partikelemission. Die Abgasrückführungsrate ist bei schwachen Motorlasten hoch und bei hoher Motorlast niedrig. Beim Pkw ist der Schwachlastbereich dominierend, daher ist eine Abgasrückführung möglich. Nutzfahrzeuge fahren hingegen vorwiegend mit Volllast, weshalb bisher eine Abgasrückführung nicht sinnvoll erschien. Bei den Lkw wird derzeit der Einsatz von neuartigen Ventilen untersucht um eine stetige Abgasrückführung auch im Lkw-Bereich zu ermöglichen.

Durch einen nachgeschalteten **Oxidationskatalysator** werden vorwiegend die gasförmigen Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid und Wasser oxidiert. Die an den elementaren Kohlenstoff adsorbierten organisch löslichen Kohlenwasserstoffe werden, als Anteil an der Gesamtpartikelmasse, ebenfalls mit hohem Wirkungsgrad oxidiert. Die Konzentration an elementarem Kohlenstoff im Abgas bleibt hingegen nahezu unverändert. Der Wirkungsgrad des Katalysators wird von der Katalysatorzusammensetzung und der Abgastemperatur sowie vom Volumen und der Zelldichte entscheidend mitbestimmt.

An **Partikelfiltersystemen** sind verschiedene erhältlich oder in der Entwicklung. Das Erfolgsversprechendste ist das Continuous-Regenerating-Trap-System, kurz CRT-System genannt. Dabei wird die Eigenschaft eines Edelmetall-beschichteten Oxidationskatalysators genutzt, der aus Stickstoffmonoxid (NO) Stickstoffdioxid (NO₂) bildet. Im nachgeschalteten Rußfilter erfolgt der umgekehrte Vorgang. Das so freigesetzte Sauerstoff-Atom verbrennt (oxidiert) den Kohlenstoff bereits bei niedrigeren Abgastemperaturen (<450 °C) zu Kohlendioxid. Voraussetzung ist allerdings die Verwendung von nahezu schwefelfreiem Dieselmotorkraftstoff (höchstens < 50 ppm, besser < 10 ppm), da sonst inakzeptabel hohe Sulfat-Emissionen entstehen.

Eine weitere Möglichkeit Partikel wieder aus dem Filter zu entfernen ist die Regenerierung mit Additiven. Hierzu wird z.B. dem Kraftstoff beim Volltanken über eine Pumpe die notwendige Menge an Additiv zudosiert. Dieses Additiv bewirkt im Brennraum eine Verringerung der Partikelbildung und lagert sich außerdem an die Partikel an und setzt deren Abbrenntemperatur auf ca. 250 °C herab. Sobald diese erreicht ist, wird der Filter dadurch regeneriert, dass die Partikel im Filter abbrennen. In der Brennkammer des Motors entstehen jedoch vermehrt Feinstpartikel. Daher darf die Additivierung von Dieselmotorkraftstoff nur bei gleichzeitiger Verwendung eines geeigneten Filtersystems erfolgen.

Beim Vergleich dreier **Dieselmotorkraftstoffqualitäten** in Bezug auf die Partikelbildung zeigte sich, dass ein niedriger Aromaten- und Schwefelgehalt zu einer stark verminderten Bildung von kleinen Partikeln (< 1 µm) führt. Auch wurde in dieser Untersuchung von Concawe (Europäische Vereinigung der Mineralölfirmen für Umweltschutz, Gesundheit und Sicherheit) die Partikelgrößenverteilung von Ottomotor- und Dieselfahrzeugen untersucht. Dabei ist auffällig, dass die meisten Partikel im Dieselmotorabgas weitgehend geschwindigkeitsunabhängig einen Durchmesser von 100 nm aufweisen. Beim Ottomotor tritt dagegen eine Geschwindigkeitsabhängigkeit auf. Während bei konstant 50 km/h die Partikelgrößenverteilung gleichmäßig in einem weiten Bereich von 10-1000 nm und deutlich unter der Partikelanzahl-Emission des Dieselmotors von etwa 10¹⁴ lag (drei bis vier Zehnerpotenzen geringer), so verschob sich diese Verteilung bei einer Geschwindigkeit von konstant 120 km/h auf ein Maximum bei ca. 50 nm. Das bedeutet, dass der Ottomotor bei dieser Geschwindigkeit durchaus sehr kleine Partikel emittiert, allerdings mengenmäßig etwa eine Zehnerpotenz geringer als der Dieselmotor. Es sind jedoch weitere Messungen erforderlich um dieses Ergebnis zu untermauern. Weiterhin ist der Partikelaustritt von Pkw mit Direkteinspritzung dringend zu untersuchen, da vermutet wird, dass der Ausstoß von sehr kleinen Partikeln höher ist als bei herkömmlichen Diesel-Pkw.

Messungen an **Bussen** mit Diesel-Motoren auf dem Prüfstand haben ergeben, dass die Kombination Oxidationskatalysator und CRT-Filtersystem sowohl die Einhaltung des Grenzwertes für Kohlenwasserstoffe, als auch des Grenzwertes für die Partikelmasse nach EURO IV ermöglicht, wobei Voraussetzung hierfür die Verwendung von Dieselmotorkraftstoff mit maximal 10 ppm Schwefel ist. Erdgas-

Busse mit nachgeschaltetem Oxidations- bzw. 3-Wege-Katalysator erreichen zwar den Grenzwert für die Partikelmasse, jedoch nicht den für Kohlenwasserstoffe nach EURO IV.

Unter Praxisbedingungen auf einer Londoner Linie lag die Partikelmassenemission bei etwa 0,025 g/km und beim Erdgasbus bei 0,04 g/km. Die Messwerte sind mit den Grenzwerten der EURO IV nicht direkt vergleichbar, da die EURO IV g/kWh vorgibt.

Bei Untersuchungen an einem **Lkw-Motor** wurde festgestellt, dass unter Verwendung des CRT-Filter-systems mit 10 ppm schwefel-haltigem Dieselmotorkraftstoff EURO IV bezüglich der Partikelmasse-Emission eingehalten werden kann.

Allgemein ist anzumerken, dass aus den drei Bereichen derzeit nur wenige Ergebnisse über Messungen der Partikelanzahl und Größenverteilung in Abgasen von Kraftfahrzeugen (Pkw, Lkw, Busse) vorliegen. Außerdem war die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse dadurch erschwert, dass bei den Untersuchungen Kraftfahrzeuge mit unterschiedlichen Hubräumen und Karosseriegewichten verwendet wurden. Der europäische Automobilverband ACEA wird Anfang 2000 einen Bericht über Partikelmessungen an Diesel-Pkws verschiedener europäischer Hersteller veröffentlichen, dem im Herbst einer über Messungen an Diesel-Lkws folgen soll. Es bleibt zu hoffen, dass damit dann eine breitere Basis zur Beurteilung der Partikel-Emission vorliegt.

Aufgrund der vorliegenden Messergebnisse ist aber die Schlußfolgerung möglich, dass bei Einsatz eines geeigneten Filtersystems in allen drei Bereichen der EURO IV-Grenzwert für die Partikelmasse schon heute und nicht erst 2005/6 bei Einführung von EURO IV erreichbar ist. Es müssen allerdings für das CRT-System zumindest im Lkw-Bereich etwa alle 80-100Tausend km derzeit noch 15000 DM für ein neues CRT-Filtersystem aufgewendet werden.

Der stetig steigende Anteil von Dieselfahrzeugen an der Kfz-Flotte macht eine intensive Beobachtung der Entwicklung bei der Partikelemission auch weiterhin notwendig.

9. Anhang

9.1 Stand der gesetzlichen Verordnungen auf EU-Ebene

Tabelle 9.1 : EU-Grenzwerte für Diesel-Pkw, Werte im „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ) , bei EURO 3 und 4 im modifizierten NEFZ

EU-Grenzwerte für Diesel-Pkw, Werte im „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ) , bei EURO 3 und 4 im modifizierten NEFZ						
NEFZ-Emissionen	HC + NOx	NOx	HC	CO	Partikel	Bem.
Diesel-Pkw [g/km]						
91/441/EWG EURO 1	1,13			3,16	0,18	a
94/12/EG (EURO 2)	0,7 / 0,9			1,0	0,08 / 0,1	a
EURO 3 ab 2000/1	0,56	0,50		0,64	0,05	b, c
EURO 4 ab 2005/6	0,30	0,25		0,50	0,025	b, c

Bemerkungen:

a NEFZ, altes Messverfahren

b NEFZ, neues Messverfahren mit Berücksichtigung der Startemissionen

c Richtlinie 98/69/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 13.Okt. 1998 über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zu Änderungen der Richtlinie 70 / 220/ EWG des Rates. Der höhere Wert für Diesel-Pkw nach EURO 2 gilt für direkteinspritzende Dieselmotoren bis zum 30.9.99. Zusätzlich gibt es steuerliche Anreize für die Erfüllung der Normen nach D3 bzw. D4, die EURO III / IV nahekommen. EURO-4-Werte beruhen auf der Verfügbarkeit verbesserter Kraftstoffe

Tabelle 9.2: Anteile der Emissionsstufen bei den Pkw-Neuzulassungen in Deutschland ab 1995 [I-FEU]

Diesel-Pkw				
	EURO I	EURO II	EURO III	EURO IV
1995	50 %	50 %		
1996		100 %		
1997		100 %		
1998		80 %	20 %	
1999		60 %	40 %	
2000		30 %	70 %	
2001			100 %	
2002			80 %	20 %
2003			60 %	40 %
2004			40 %	60 %
2005			20 %	80 %
2006				100 %

Tabelle 9.3: EU-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge einer Gesamtmasse > 3,5 t [EU, UBA, VDA]

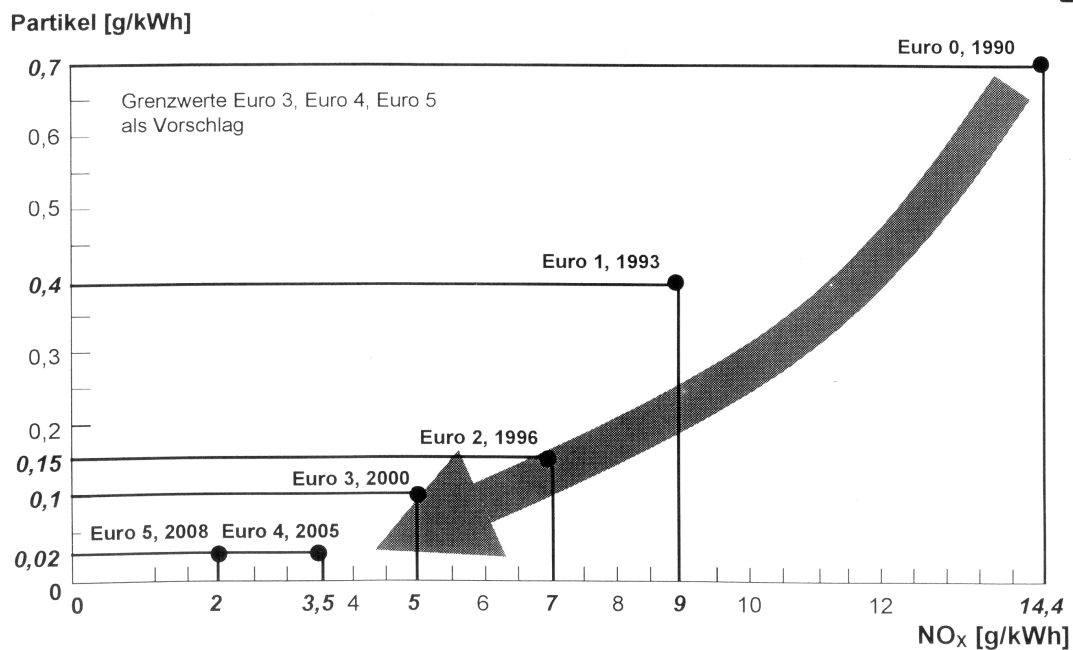
EU-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge einer Gesamtmasse > 3,5 t					
[g/kWh]	NO _x	HC	CO	Partikel	Bem.
88 / 77 EWG					
13-Stufen-Test < 1992	15,8	2,6	12,3		
91 / 542 / EWG A (EURO 1)					
13-Stufen-Test; ab 1996 / 97	7,0	1,1	4,0	0,15	
EURO 3 - ESC-Zyklus ab 2000/1	5,0	0,66	2,1	0,10	a
EURO-4 ESC-Zyklus ab 2005/6	3,5	0,46	1,5	0,02	a
„EURO 5“-ESC-Zyklus ab 2008	2	0,46	1,5	0,02	b

Bemerkungen:

a ESC European Steady Cycle, auch OICA genannt

b Gemäss gemeinsamen Standpunkt des Umweltministerrates vom 21.12.98

Entwicklung der Abgasgesetzgebung für NO_x- und Partikelemission bei Nutzfahrzeugen



TVA-N, 22.09.99

Abbildung 9.1: Entwicklung der Abgasgesetzgebung für NO_x- und Partikelemissionen bei Nutzfahrzeugen

Tabelle 9.4: Anteile der Emissionsstufen an den Neuzulassungen der schweren Nutzfahrzeuge bis 1999

	LKW 3,5 - 7,5t			LKW 7,5 - 14 t SZ < 200 kW			LKW > 14 t SZ > 200 kW		
	Konv.	EURO I	EURO II	konv.	EURO I	EURO II	konv.	EURO I	EURO II
vor 91	100 %			100 %			100 %		
1991	100 %			100 %			90 %	10 %	
1992	60 %	40 %		50 %	50 %		50 %	50 %	
1993	40 %	60 %		30 %	70 %		20 %	80 %	
1994		80 %	20 %		80 %	20 %		80 %	20 %
1995		50 %	50 %		45 %	55 %		40 %	60 %
1996		25 %	75 %		10 %	90 %		5 %	95 %
>1996			100 %			100 %			100 %

[KBA, VDA, BMU-Arbeitsgruppe]

Tabelle 9.5: Schätzung der Anteile der Emissionsstufen an den Neuzulassungen der schweren Nutzfahrzeuge ab 2000, geschätzt

	EURO II	EURO III	EURO IV	EURO V
2000	50 %	50 %		
2001		100 %		
2002		90 %	10 %	
2003		70 %	30 %	
2004		50 %	50 %	
2005		20 %	80 %	
2006			80 %	20 %
2007			20 %	80 %
2008			50 %	50 %
>2008				100 %

[BMU-ARBEITSGRUPPE, IFEU-ABSCHÄTZUNG, IFEU HEIDELBERG 1999]

9.2 Aktuelle Meinungen aus Politik und Wissenschaft

Schweiz [BUWAL, Bulletin 1/98]

Zur Einhaltung der EURO 3 ist der Partikelfiltereinbau noch nicht zwingend vorgeschrieben, aber notwendig. Es ist die kostengünstigste und wirksamste Maßnahme um die Zahl der emittierten Feinstpartikel mit einem Durchmesser von 10 - 500 Nanometer um 99 % zu reduzieren. Wie sich im Rahmen des VERT Projektes gezeigt hat, senkt der Partikelfilter auch den Gehalt an polyzyklischen, aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) im Abgas. Desweiteren wurde festgestellt, dass der Einsatz in der Praxis keine besonderen Probleme stellt. Dies bestätigen auch Erfahrungen verschiedener öffentlicher Transportbetriebe, darunter der der Stadt Zürich, bei dem 150 Dieselbusse mit Partikelfiltern

verkehren. Der Preis für eine Umrüstung liegt bei 10000 bis 25000 Schweizer Franken. Der Nachteil ist die Erhöhung des Treibstoffverbrauchs um 2 - 4%. Unwirksam sind die Partikelfilter hinsichtlich der NO_x -Reduktion.

Eine verheißungsvolle Variante ist das CRT-System (Continuously Regenerating Trap). Das System ist bereits weit verbreitet, beispielsweise sind in Schweden 2000 Busse damit ausgerüstet. Einzige Bedingung ist ein schwefelarmer Dieselmotorkraftstoff mit weniger als 10 ppm Schwefel. In der Schweiz fahren in Liestal BL einige mit CRT ausgerüstete Busse. Der Preis liegt zwischen 10000 und 15000 Schweizer Franken.

Schweden [Environmental Agency 11/98]

Dieselfahrzeuge sind schädlicher für die Umwelt und die Gesundheit als Ottomotorkraftfahrzeuge. Dieselfahrzeuge wurden in den letzten zehn Jahren zwar verbessert, aber die Abgastechnologie bei den Benzinern entwickelte sich schneller. Eine Studie der Schwedischen EPA hat ergeben, dass bei einem Anstieg der Neuzulassungen von 1 % auf 20 % die NO_x Emissionen der Neuwagen sich verdoppeln würden und die Partikelemissionen um das 2 ½ fache anstiegen. Dieselfahrzeuge benötigen zwar 20 - 25 Prozent weniger Kraftstoff, jedoch emittiert ein Liter Diesel etwa 15 % mehr CO_2 als ein Liter Ottokraftstoff. Daher ergibt sich bei oben genanntem Anstieg nur eine CO_2 -Reduktion in der Emission von Fahrzeugen von 1-2 %. Die Emissionen von Dieselfahrzeugen werden als 3-4 Mal karzinogener eingestuft, als die Emissionen von Benzinern. Reino Abrahamson betonte: „Um die Umweltschutzziele zu erreichen, sollten wir die Anzahl der Dieselfahrzeuge reduzieren. Der gegenwärtige Trend zum Kauf eines Diesel-Pkw anstelle eines Benziners geht in die völlig falsche Richtung. „ Anfang der 90er waren nur 1 % aller Neuzulassungen im Pkw-Bereich in Schweden Diesel, im August 1998 betrug ihr Anteil 15 %.

Schweden Karolinska Institut Stockholm 6/99

Bericht „Acute effects on health by ambient air pollution“ Jeder zehnte Lungenkrebs wird vom Verkehr verursacht. Diese Studie wurde von der Umweltbehörde der Stadt Stockholm und dem Karolinska Forschungsinstitut durchgeführt. Dabei wurden 3400 Personen, darunter 1000 mit Lungenkrebs, untersucht. Deren Wohnadressen seit 1950 wurden mit der entsprechenden Verkehrsdichte in diesen Straßen verglichen. Es besteht eine 40 prozentige Risikosteigerung für eine Krebserkrankung für diejenigen, die in besonders verkehrsdichten Wohngebieten wohnen oder gewohnt haben. Die Dieselaabgase sind laut Professor Göran Pershagen, Leiter der Forschungsgruppe, am gefährlichsten. Daher ist es besonders beunruhigend, dass der Anteil an dieselgetriebenen Pkws im Verkehr ständig steigt.

Deutschland Umweltbundesamt 8/99

Partikelfilter für alle Fahrzeuge einführen:

Partikelfilter für Dieselmotoren oder eine gleichwertige Technologie sollte nicht nur bei schwere Nutzfahrzeuge sondern auch bei Diesel-Pkw und leichten Nutzfahrzeugen eingesetzt werden. Die Autoren einer Studie unter der Federführung des Fraunhofer Instituts für Toxikologie und Aerosolforschung in Hannover im Auftrag des Umweltbundesamtes kommen zu dem Schluss, dass mittels eines Partikelfilters die Schadstoffemissionen und somit das von den Partikeln ausgehende Krebsrisiko um 90 % gesenkt werden könnte.

10. Literaturverzeichnis

[concauwe, 1998]

concauwe report 98/51 „ a study of the number, size & mass of exhaust particles emitted from european diesel and gasoline vehicles under steady-state and european driving cycle conditions“

[DIN ISO,1996]

DIN ISO 7708: Luftbeschaffenheit – Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme (Januar 1996)

[DIN EN,1993]

DIN EN 481: Arbeitsplatzatmosphäre – Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel (September 1993)

[EMPA, 1999]

EMPA-Bericht Nr. 172847, 1999

[Hawker P., 1997]

Hawker P., "Experience with a New Particulate Trap Technology in Europe", SAE 970182, 1997.

[Hawker P., 1998]

Hawker P. et al., "Effect of a Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter on Non-Regulated Emissions and Particle Size Distribution", SAE 980189, 1998 .

[Health effects institute, 1999]

„Diesel Emissions and Lung Cancer: Epidemiology and Quantitative Risk Assessment, A Special Report of the Institute`s Diesel Epidemiology Expert Panel“, Health Effects Institute U.S., Juni 1999

Hydrocarbon Adsorber/Lean NOx Catalysis Leading to Durable Euro 3 Performance", SAE 982603, 1998

[Jing L., 1997]

Jing.L: Charakterisierung der dieselmotorischen Partikelemission, Dissertation an der Philosophisch-naturwissenschaftl. Fakultät, Universität, Bern, 1997

[Klingenberg, 1992]

Klingenberg H., Schürmann D., Lies K.H. (1992): Rußpartikel im Dieselmotorabgas - Entstehung und Messung, in: Auswirkungen von Dieselmotorabgasen auf die Gesundheit. 5 Jahre Forschungsförderung; ein Arbeitsschwerpunkt im Rahmen des Programms "Umweltforschung und Umwelttechnologie" Förderschwerpunkt "Umweltbelastung und Gesundheit", München, GSF

[Krasenbrink, 1996]

Krasenbrink A.(1996): Partikelförmige Dieselmotoremissionen und ihr Beitrag zur Immissionsbelastung in Städten Niedersachsens. Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover, Band 51

[LfU Baden-Württemberg/ Universität Heidelberg, 1997]

[LfU/UMEG 1998]

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen mbH, Schwebstaubbelaugung in Baden-Württemberg, Kapitel 3 (1998)

[Müller, 1984]:

Müller J. (1984): Atmospheric Residence Time of Carbonaceous Particles and Particulate PAH-Compounds, Sci. Total Environ. 36, 339-346

[Needham J. 1991]

Needham J. 1991. "Engine Experience and EPA Regulations", University of Minnesota Short Course "Diesel Particulate Matter", October 1991

[Nießner, 1995]:

Nießner R. et al. (1995): Partikelimmission: Quellen, Ausbreitung, Umwandlung - Literaturstudie. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) Schriftenreihe Nr. 124, Frankfurt, 130 S.

[Ogren und Charlson 1983]:

Ogren J.A., Charlson R.J. (1983): Elemental Carbon in the Atmosphere: Cycle and Lifetime, Tellus 35B, 241-254

[Pott, 1991]

Pott F. (1991): Dieselmotorabgas - Tierexperimentelle Ergebnisse zur Risikoabschätzung. In: Krebserzeugende Stoffe in der Umwelt - Herkunft, Messung, Risiko, Minimierung. VDI-Bericht 888, S. 211-244 Düsseldorf, VDI-Verlag

[Sher E. 1998]

E.Sher, Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines, Academic Press, 1998, Kapitel 14: Air Pollution from Large Two-Stroke Diesel Engines, Seite 496

[Siegmann K., Siegmann H.C., 1998]

Siegmann K., Siegmann H.C., Entstehung von Kohlenstoffpartikeln bei der Verbrennung organischer Treibstoffe, Haus der Technik, Seminar „Feinstpartikelemissionen von Verbrennungsmotoren“ 12.-13. Oktober 1999, München

[Smedler G. 1996]

Smedler G. et al., "Diesel Catalysts for Europe beyond 1996", Automotive Engineering, October 1995, 41

[TÜV Bayern, 1994]

Prüfbericht Nr. 351-139-94-FBFE TÜV Bayern 18.10.1994

[UBA, 1998]

[UBA, S.Rodt, 2. Stellungnahme zum Einsatz von Additiven als Regenerationshilfe für Partikelsysteme, März 98]

[UBA, 1999]

UBA, Mangelsdorf I., Aufderheide M., Boehnke A., „Durchführung eines Risikovergleiches zwischen Dieselmotoremissionen und Ottomotoremissionen hinsichtlich ihrer kanzerogenen und nicht-kanzerogenen Wirkung“ Forschungsbericht 297 61 001/01, UBA-FB 99-033

[U.S.EPA, 1999]

U.S. EPA, „Revised draft assessment of possible diesel health hazards, SAB Review Draft, November 1999, EPA/600/8-90/057D

[VERT]

VERT, Berichte 1-10, Projektleitung: TTM, Technik Thermische Maschinen, Niederrohrdorf, Schweiz;
Berichterstattung: Ingenieurschule Biel, ETH-Hönggerberg

[20. Wiener Motorensymposium]:

20. Wiener Motorensymposium, Potential der Common Rail Einspritztechnologie beim DE Dieselmotor, Krämer M. et al. ,S. 411